Geipel-Kreisel-Leopold

Reformierte Rechtschreibung

Physik

C. C. Buchner

10

Staatliche Realschule
Maisach

Jahrgangsstufe

Fahrradnummer / Kennzeichen

Tag der Anschaffung: Anschaffungspreis:

Klasse	Name	Schuljahr
10e	Peter Hermann	97/98
10c	Heigl Susanne	98/99
10c	Stefan Brennessel	99/2000
10d	Benjamin Lubosz	00/01
10b	Schlömmer S.	02/03
10D	Jun G.	
10f	Hochenblacher J.	04/05

Physik 10"

Elektrizitätslehre
Einführung in die Atom- und Kernphysik
Grundlagen der Energieversorgung

herausgegeben und bearbeitet von Rudolf Geipel und Dr. Klaus Kreisel
auf der Grundlage des Lehrwerks **Physik** von Hans Leopold und Rudolf Zins

Zeichnungen: Karl Peschke, Ebenhausen
Kurt Turbanisch, Litzendorf
Reproduktionen: Döss, Klischee und Litho, Nürnberg
Druck- und Bindearbeiten: Graphischer Großbetrieb Friedrich Pustet, Regensburg

Auflage: 1 5 4 3 2 1 00 99 98 97 96
Die letzte Zahl bedeutet das Jahr des Drucks.
Alle Drucke dieser Auflage sind, weil untereinander unverändert, nebeneinander benutzbar.

© C. C. Buchners Verlag, Bamberg 1996

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

ISBN 3 7661 **3270** 9

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrische Arbeit, elektrische Energie, elektrische Leistung, elektrische Spannung 6

1.1. Elektrischer Strom, elektrische Spannung 6
1.2. Elektrische Arbeit 7
1.3. Elektrische Energie 8
1.4. Messung der elektrischen Arbeit 8
1.5. Elektrische Arbeit im Stromkreis 9
1.5.1. Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Arbeitszeit t 9
1.5.2. Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Stromstärke I 10
1.5.3. Abhängigkeit der elektrischen Arbeit W_{el} von der Spannung U 10
1.6. Elektrische Spannung als abgeleitete Größe 11
1.7. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen 12
1.8. Elektrische Leistung 15
1.9. Anwendungsbeispiele 16

2. Ohmsches Gesetz, elektrischer Widerstand 18

2.1. Ohmsches Gesetz 18
2.2. Elektrischer Widerstand 19
2.2.1. Definition des elektrischen Widerstandes 19
2.2.2. Bestimmung von Widerständen 20
2.3. Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leiters von seiner Temperatur . . . 22
2.4. Spezifischer Widerstand 23
2.5. Anwendungsbeispiele 26

3. Reihen- und Parallelschaltung 27

3.1. Unverzweigter Stromkreis – Reihenschaltung von Widerständen 27
3.2. Verzweigter Stromkreis – Parallelschaltung von Widerständen 29

4. Die elektromagnetische Induktion 33

4.1. Induktion in bewegten geraden Leitern 33
4.1.1. Induktionsspannung – Richtung des Induktionsstromes 33
4.1.2. Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Stärke des Magnetfeldes 35
4.2. Induktion in Spulen 36
4.3. Lenzsche Regel – Energieumwandlung 39
4.4. Selbstinduktion 41
4.4.1. Wirkung der Selbstinduktion in einem Gleichstromkreis 41
4.4.2. Wirkung der Selbstinduktion in einem Wechselstromkreis 42
4.5. Wechselstromgeneratoren 44
4.5.1. Die Entstehung von Wechselspannung 44
4.5.2. Technische Wechselstromgeneratoren 46
4.6. Transformatoren 48
4.6.1. Bau- und Funktionsweise eines Transformators 48
4.6.2. Transformatorgesetze 48
4.6.3. Niederspannungstransformatoren 50
4.6.4. Hochspannungstransformatoren 51
4.6.5. Hochstromtransformatoren 51
4.6.6. Übertragung elektrischer Energie auf große Entfernungen 52

5. Elektrizitätsleitung in Gasen 56

5.1. Gase als Isolatoren 56
5.2. Gase als sehr schlechte Leiter – spontane Ionisation 56
5.3. Gase als Leiter – unselbständige Gasentladung 57
5.4. Gase als Leiter bei vermindertem Druck – selbständige Gasentladung 59
5.4.1. Stoßionsation – Glimmentladung 59
5.4.2. Deutung der Glimmlichterscheinungen 60
5.4.3. Anwendungen der Glimmentladung 60
5.5. Gase als Leiter bei Atmosphärendruck – Funkenentladung – Lichtbogen 63
5.5.1. Gewitter, Blitz und Donner 63
5.5.2. Spitzenentladung 64
5.5.3. Kohlenlichtbogen 64

6. Elektrizitätsleitung im Vakuum 66

6.1. Glühemission von Elektronen – Deutung des glühelektrischen Effekts 66
6.2. Erzeugung und Eigenschaften von Elektronenstrahlen 68
6.3. Anwendung der Elektronenstrahlröhre 71
6.3.1. Braunsche Röhre 71
6.3.2. Oszilloskop 71
6.3.3. Fernsehbildröhre (schwarz-weiß) 71

7. Grundlagen der Atom- und Kernphysik 74

7.1. Atome und ihr Aufbau 74
7.2. Radioaktive Strahlung 78
7.2.1. Begriff der radioaktiven Strahlung 78
7.2.2. Nachweis der radioaktiven Strahlung 78
7.2.3. Radioaktiver Kernzerfall – Strahlung 80
7.2.4. Energie der radioaktiven Strahlung 81
7.3. Radioaktiver Zerfall und Kernumwandlungen 85
7.3.1. Halbwertszeit 85
7.3.2. Zerfallsprodukte bei der natürlichen Radioaktivität 86
7.3.3. Künstliche Kernumwandlung durch Neutronenbeschuss 86
7.3.4. Kernspaltung 87
7.3.5. Kernverschmelzung 88
7.4. Gefahren und Nutzen der radioaktiven Strahlung 91
7.4.1. Strahlenbelastung, Strahlenquellen und Strahlenschäden 91
7.4.2. Strahlenschutz 92
7.4.3. Anwendung der Radioaktivität 93

8. Die Energieträger und die Auswirkungen ihrer Verwendung 95

8.1. Grundbegriffe der Energiewirtschaft 95
8.2. Energiebedarf und Energievorräte 97
8.3. Umweltbelastungen 100

9. Kraftwerke 104

9.1. Wasserkraftwerke 104
9.2. Wärmekraftwerke 106
9.3. Kernkraftwerke 108
9.3.1. Kontrollierte und gesteuerte Kettenreaktionen 108

9.3.2. Kernreaktoren ... 108
9.3.3. Auswirkungen eines Kernkraftwerkes auf die Umgebung ... 109
9.3.4. Sicherheit von Kernkraftwerken ... 109
9.3.5. Brennelementlagerung und Entsorgung ... 110
9.3.6. Weitere Reaktortypen ... 111
9.3.7. Fusionsreaktoren ... 111

10. Solarenergie ... 112

10.1. Grundlagen der Solarenergie ... 112
10.2. Solartechniken ... 115
10.2.1. Sonnenkollektoren ... 115
10.2.2. Solarzellen ... 116
10.2.3. Solar-Wasserstoff-Technik ... 117
10.2.4. Passive Nutzung der Sonnenenergie ... 118

11. Rationelle Verwendung von Energie ... 120

11.1. Energieentwertung bei Energieumwandlungen ... 120
11.2. Möglichkeiten zur sparsamen Nutzung der Energie ... 121

12. Projektorientiere Themen ... 124

Stichwortverzeichnis ... 125

Bildnachweis:

Die Vorlagen für die Fotografien stellten zur Verfügung: AKG, Berlin; Bavaria-Verlag, Gauting; Bayernwerk, München; Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen; Deutsche Gesellschaft für Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen GmbH, Hannover; Deutsches Museum, München; dpa, Frankfurt; Eberline Instruments, Erlangen; Energieversorgung Schwaben; R. Geipel, Regenstauf; Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München; Keystone, Hamburg; Klinikum Großhadern, München; Dr. F. Krantz, Bonn; Bildagentur Mauritius, Mittenwald; A. Riedl, Memmelsdorf; F. Schüß, Bischberg; Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH, München; ZEFA, Düsseldorf.

I. Elektrische Arbeit, elektrische Energie, elektrische Leistung, elektrische Spannung

I.1. Elektrischer Strom, elektrische Spannung

Elektrische Geräte sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Um sie in Betrieb zu setzen, benötigt man eine *Stromquelle.* Ein einfaches Beispiel ist ein Glühlämpchen, das man an eine Batterie anschließt, damit es leuchtet *(Abb. 6.1.)*. Die Batterie wirkt wie eine „Ladungspumpe", die den Fluss der elektrischen Ladung im Leiterkreis aufrecht erhält.

Zur Beschreibung des elektrischen Stroms haben wir die physikalische Größe **elektrische Stromstärke** mit der **Einheit 1 Ampere** eingeführt. Die elektrische Stromstärke ist eine *Grundgröße,* da man sie nur mit Hilfe eines Messverfahrens festgelegt hat. Sie wurde nicht wie abgeleitete Größen mit Hilfe einer Definitionsgleichung auf andere physikalische Größen zurückgeführt.

Die Stromstärke kann man durch die „Fördermenge" an elektrischer Ladung veranschaulichen, die die Stromquelle als „Ladungspumpe" durch den Stromkreis transportiert.

Im Zusammenhang mit elektrischen Geräten oder mit elektrischen Stromkreisen verwendet man oft eine zweite physikalische Größe, die **elektrische Spannung**. Man spricht von der *Haushaltsspannung* 230 V oder von den 12-V- bzw. 24-V-*Stromkreisen* in *Kraftfahrzeugen* und meint damit anschaulich die „Druckdifferenz", die an den beiden Anschlüssen der Stromquelle vorherrscht und die die Ladung im Stromkreis antreibt.

Die elektrische Spannung ist die Ursache des elektrischen Stroms. Sie ist umso größer, je stärker der Strom ist, den die Stromquelle in einem geschlossenen Stromkreis bewirkt. Das kann man erkennen, wenn man ein Glühlämpchen zuerst an eine Monozelle mit 1,5 V, dann an eine Flachbatterie mit 4,5 V anschließt; das Lämpchen leuchtet mit der Flachbatterie als Stromquelle erheblich stärker auf und zeigt damit den größeren Stromfluss an.

Wir legen die elektrische Spannung zunächst als Grundgröße fest: Die **Einheit der elektrischen Spannung ist 1 Volt**; sie wurde gerade so gewählt, dass z. B. eine Zelle eines Bleiakkumulators die Spannung 2 V besitzt. Für das Messverfahren ziehen wir ein in Volt geeichtes *Spannungsmessgerät* heran, das wir an die Pole der Spannungsquelle oder allgemeiner an die beiden Stellen des Stromkreises anschließen, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll. Damit ist die elektrische Spannung vorläufig festgelegt.

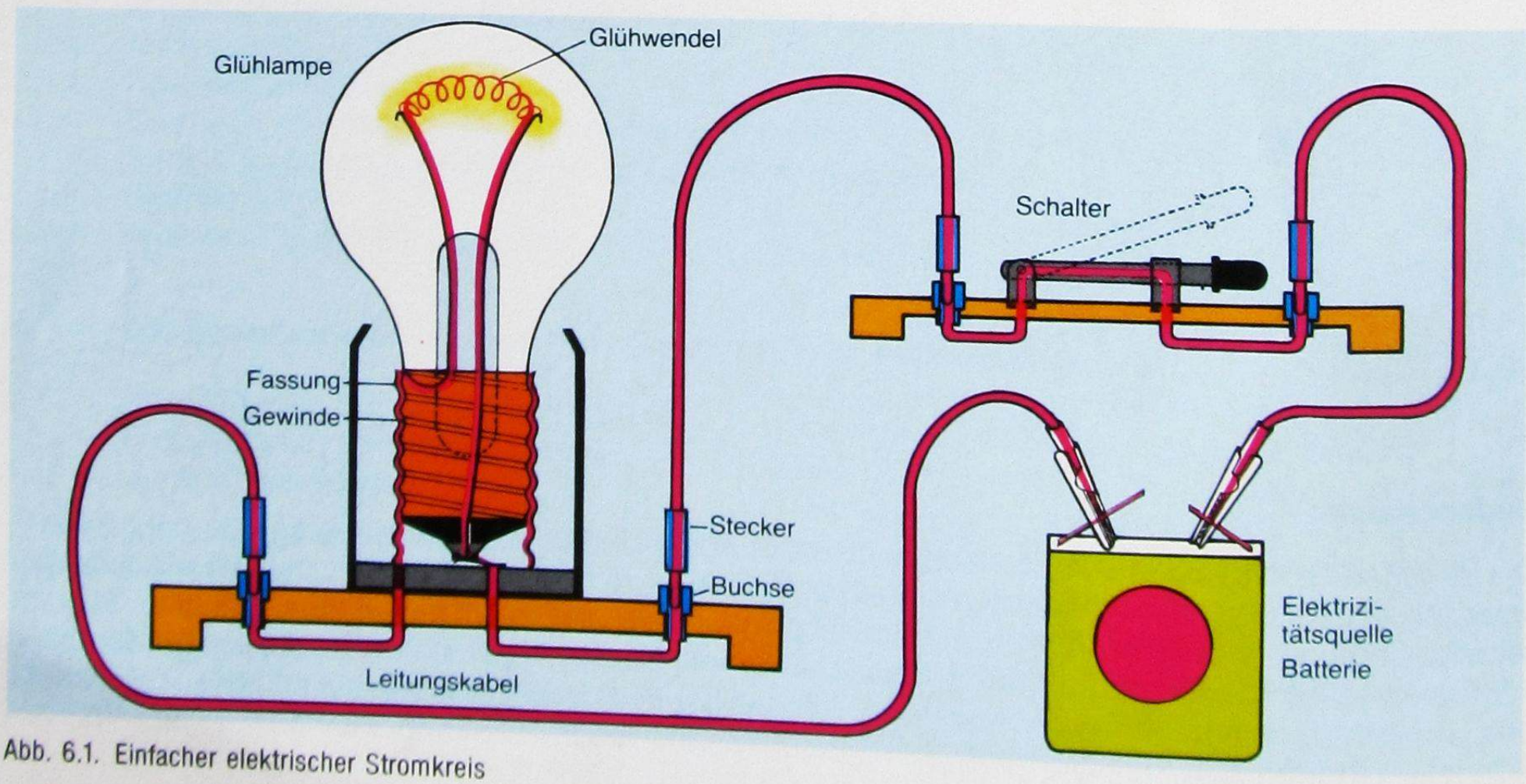


Abb. 6.1. Einfacher elektrischer Stromkreis

I.2. Elektrische Arbeit

Man kann Körper auf verschiedene Arten erwärmen. Ein Beispiel ist das Aneinanderreiben der Hände; man spürt unmittelbar, dass sich die Temperatur der Hände erhöht. Physikalisch betrachtet verrichtet man **Reibungsarbeit** an den Händen und erhöht damit ihre **innere Energie**.

Vergleicht man diesen Vorgang z. B. mit der Erwärmung eines Heizkissens, wenn durch es ein elektrischer Strom fließt, dann liegt der Schluss nahe, dass auch der elektrische Strom eine Arbeit am Heizkissen verrichtet.

Bringt man einen Körper vom Fußboden auf den Labortisch, so verrichtet man an ihm **Hubarbeit**; die Lageenergie des Körpers wird dabei erhöht. Das Heben eines Körpers kann man auch durch eine elektrische Winde erreichen. Auch hier liegt der Schluss nahe, dass der elektrische Strom Arbeit verrichtet.

Wird ein Körper unter Aufwendung einer Kraft gegen eine bewegungshemmende Kraft verschoben, so wird Arbeit verrichtet.

Der folgende Versuch zeigt, wie diese Verschiebung durch eine elektrische Kraft bewirkt werden kann.

Versuch

In einer Schale befinden sich Rizinusöl, zwei Stabelektroden und eine kleine Metallkugel, die eine der beiden Elektroden berührt. Die Stabelektroden sind an ein Hochspannungsgerät (25 kV) angeschlossen. In der einen Verbindung ist ein empfindliches Stromanzeigegerät, z. B. ein Glimmlämpchen, eingeschaltet *(Abb. 7.1.)*.

Beobachtung. Bei eingeschaltetem Hochspannungsgerät bewegt sich die Kugel im Rizinusöl von der elektrisch positiven Elektrode zur elektrisch negativen Elektrode, berührt diese, bewegt sich zur elektrisch positiven Elektrode zurück, berührt diese und bewegt sich dann wieder zur elektrisch negativen Elektrode usw. Gleichzeitig beobachtet man am Stromanzeigegerät einen geringen Stromfluss.

Erklärung. Die Metallkugel wird bei der Berührung der elektrisch positiven (negativen) Elektrode elektrisch positiv (negativ) aufgeladen. Sie wird deshalb von den Elektroden abgestoßen bzw. angezogen. *(Abb. 7.2.)*. Diese Kräfte beschleunigen unmittelbar nach der Berührung die Kugel und bewegen sie dann gegen die Reibungskraft im Rizinusöl weiter. Die Kugel nimmt also, verursacht durch elektrische Kräfte, mechanische Energie auf; der elektrische Strom hat eine elektrische Arbeit verrichtet.

Zusammenfassung

Elektrischer Strom kann elektrische Arbeit verrichten.

Aufgaben

1. Wann spricht man vom Verrichten einer elektrischen Arbeit?

2. Der elektrische Strom verrichtet Arbeit. Erkläre, was damit gemeint ist.

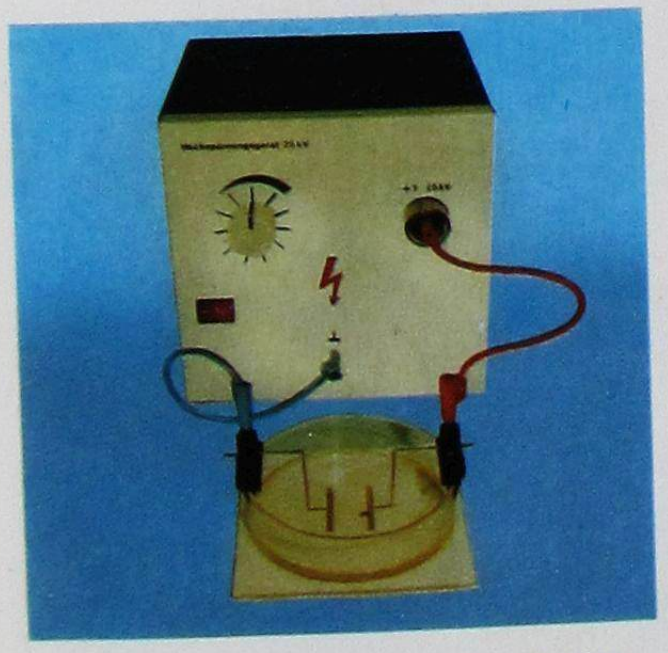


Abb. 7.1. Eine Kugel wird durch eine elektrische Kraft verschoben. Es wird elektrische Arbeit verrichtet.

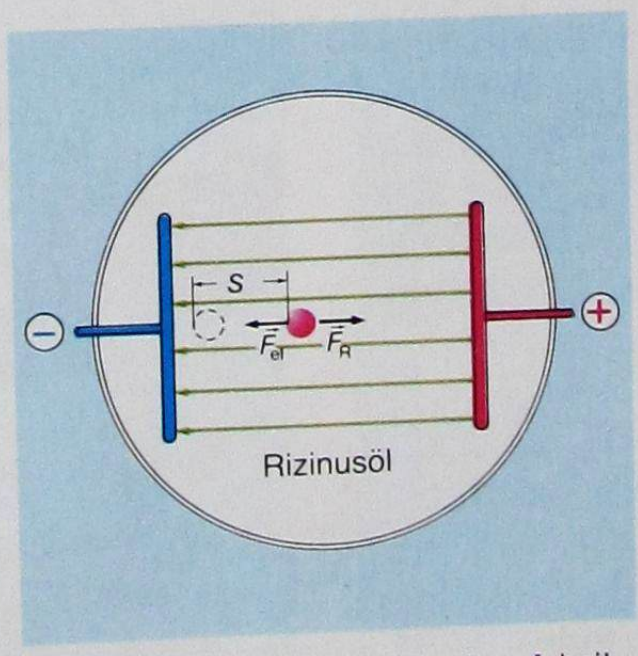


Abb. 7.2. Verrichten elektrischer Arbeit W_{el} beim Verschieben eines Ladungsträgers

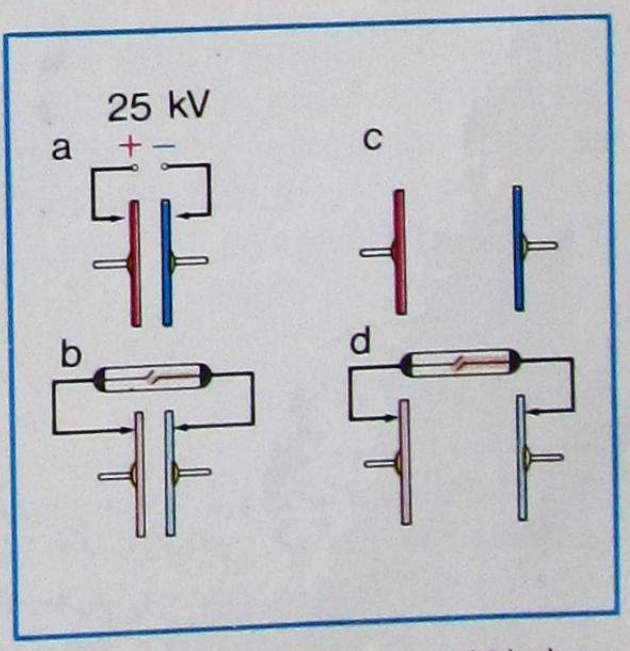


Abb. 7.3. Zu- und Abnahme elektrischer Energie beim Verrichten von Arbeit

I.3. Elektrische Energie

In einer Glühlampe, die an eine Batterie angeschlossen ist, leuchtet die Wendel. Die Ladungsträger in der Wendel und in den übrigen Leitern werden durch elektrische Kräfte bewegt; der elektrische Strom verrichtet elektrische Arbeit. Dabei wandelt sich **elektrische Energie**, die von der Batterie geliefert wird, in **innere Energie** der Wendel und der Umgebung (Erwärmung), sowie in **Lichtstrahlung** um. Die elektrische Energie der Batterie nimmt während des Betriebes der Glühlampe ab; sie wird mit der Zeit „leer".

Versuche

1. Zwei einander nahe gegenüberstehende, isolierte Metallplatten werden aufgeladen *(Abb. 7.3. a)* und anschließend über eine Stabglimmlampe entladen *(Abb. 7.3. b)*.
2. Die Platten werden gleich stark wie bei Versuch 1 aufgeladen *(Abb. 7.3. a)*, auseinander geschoben *(Abb. 7.3. c)*, und nun wieder über die Stabglimmlampe entladen *(Abb. 7.3. d)*.
Beobachtungen. Die Glimmlampe leuchtet im ersten Versuch nur schwach, im zweiten Versuch dagegen hell auf, obwohl durch sie in beiden Fällen die gleiche Ladung fließt.
Erklärung. Beim Entladen der Platten fließt in der Glimmlampe ein elektrischer Strom. Dieser verrichtet elektrische Arbeit und wandelt dabei elektrische Energie in Lichtstrahlung und innere Energie um. Im zweiten Versuch wird mehr Energie umgesetzt als im ersten, weil die beiden entgegengesetzt geladenen Platten gegen die anziehenden elektrischen Kräfte noch auseinander geschoben werden. Dabei wird an den geladenen Platten mechanische Arbeit verrichtet und die elektrische Energie der Anordnung erhöht.

Bei der Ladungstrennung in einer Elektrizitätsquelle (Erzeugung elektrischer Spannung) wird ebenfalls an Ladungsträgern gegen elektrische Kräfte Arbeit verrichtet. Hierbei wird immer elektrische Energie durch Umwandlung anderer Energieformen (z. B. chemische Energie) gewonnen.

Zusammenfassung

1. Die elektrische Energie der Elektrizitätsquelle nimmt ab, wenn der Strom, den sie verursacht, elektrische Arbeit verrichtet.
2. Werden Ladungen gegen elektrische Kräfte getrennt, dann nimmt die elektrische Energie zu.

I.4. Messung der elektrischen Arbeit

Vorüberlegung

Ein Kupferstab kann z. B. mit einer Flamme oder durch Reiben mit einem Lederlappen erwärmt werden *(Abb. 8.1.)*. Die Erwärmung kann aber auch durch einen elektrischen Strom im Kupferstab erfolgen *(Abb. 9.1.)*. Die Temperatur eines Leiters und damit auch seine innere Energie können also durch Verrichten von elektrischer Arbeit erhöht werden.

Wir können uns den Stromfluss im Kupferdraht vereinfacht folgendermaßen vorstellen: Im geschlossenen Stromkreis wird jedes Leitungselektron im Inneren des Leiters durch elektrische Kräfte so lange beschleunigt, bis es bei einem Stoß mit einem Gitter-Ion seine gewonnene Bewegungsenergie an dieses abgibt. Hierauf wird es erneut bis zum nächsten Stoß mit einem anderen Gitter-Ion beschleunigt, gibt seine aufgenommene Energie wieder ab, wird erneut beschleunigt usw. Die mittlere Bewegungsenergie der Gitterionen nimmt durch die Stöße zu, d. h., die Temperatur des Leiters steigt an. Die Elektrizitätsquelle hält die Spannung an den Polen und damit die Bewegung der Ladungsträger aufrecht. Sie liefert die elektrische Energie, die beim Verrichten der elektrischen Arbeit in innere Energie des Leiters umgesetzt wird.

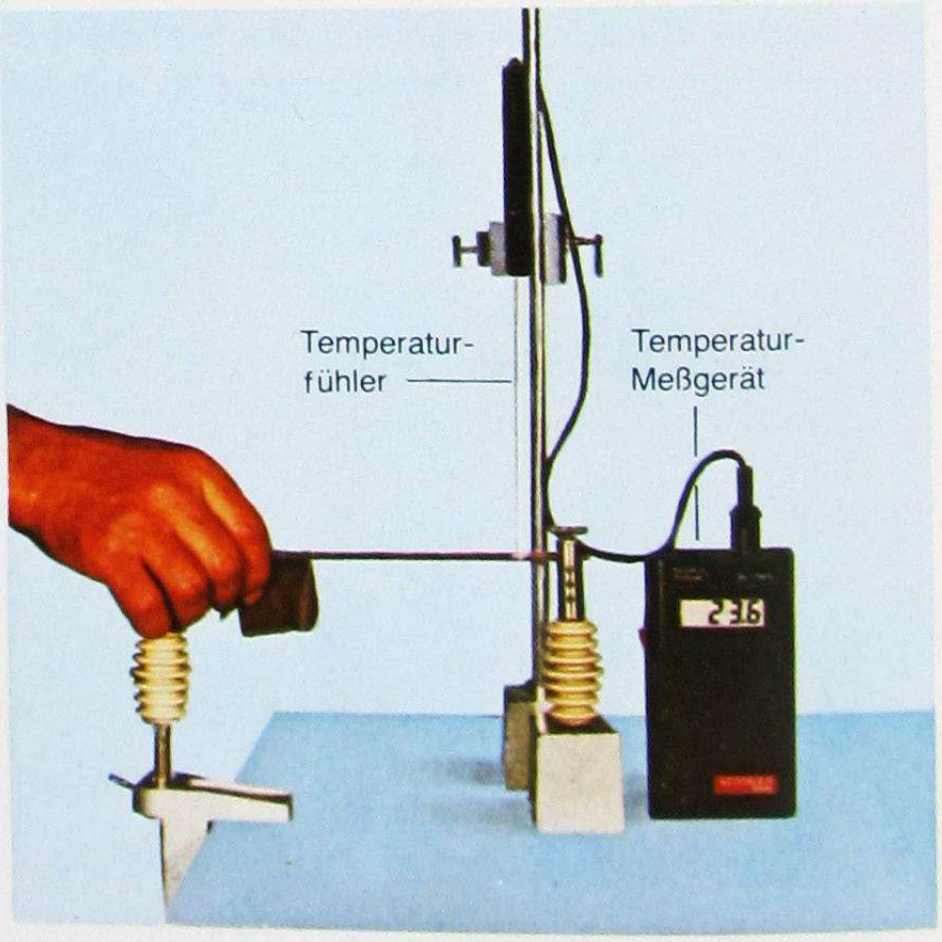


Abb. 8.1. Versuchsanordnung zur Feststellung der Erwärmung eines Kupferstabes durch Reibung

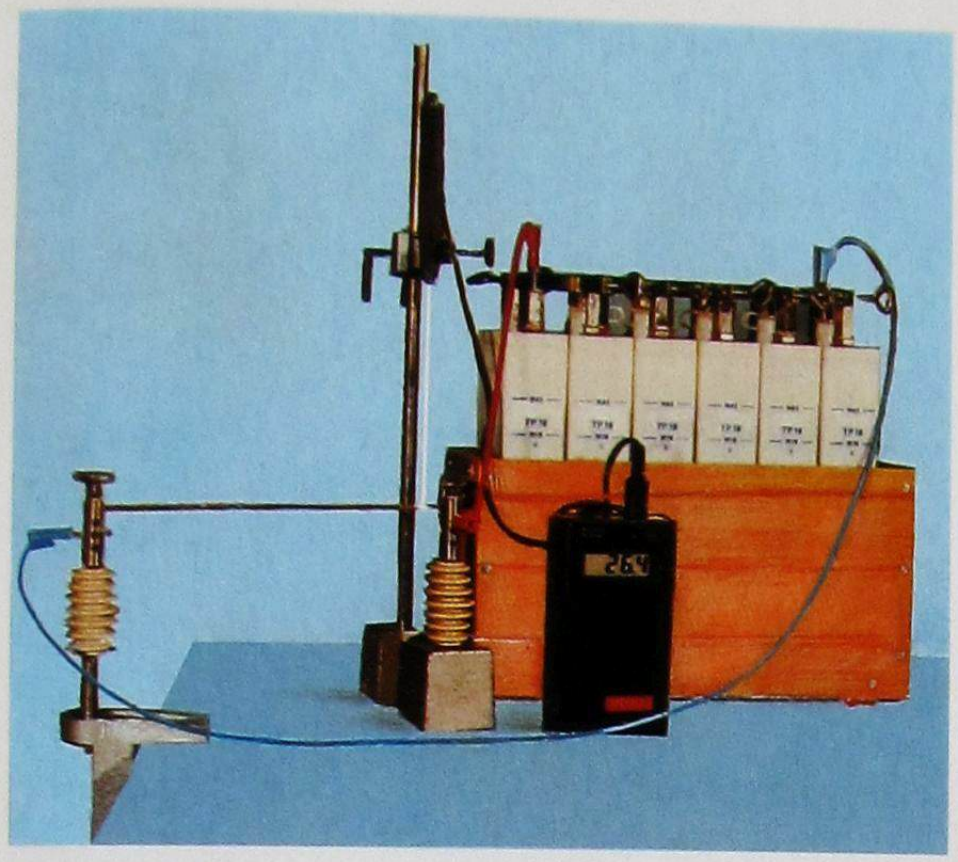


Abb. 9.1. Die Temperatur eines Kupferstabes erhöht sich, wenn in ihm ein elektrischer Strom zu fließen beginnt.

Betrachten wir die Vorgänge bei der Erwärmung genauer: Unmittelbar nach dem Einschalten des Stromes wird der Leiter durch die elektrische Arbeit zuerst selbst erwärmt. Je größer aber seine Temperatur wird, einen desto größeren Anteil der Wärme gibt er an seine Umgebung ab. Ändert sich die Temperatur des Leiters schließlich nicht mehr, so wird die gesamte elektrische Arbeit in Form von Wärme an die Umgebung weitergegeben. Das ist oft schon sehr kurz nach dem Einschalten des Stromes der Fall. Man kann dann die elektrische Arbeit W_{el} und die von der Umgebung aufgenommene Wärme $Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ gleichsetzen.

Beispiel

Mit einem Tauchsieder wird in einem Thermosgefäß Wasser mit der *spezifischen Wärmekapazität* $c = 4{,}2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$ und der Masse $m = 200$ g um $\Delta\vartheta = 50$ °C erwärmt. Das Wasser als „Umgebung" des Tauchsieders nimmt die Wärme

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta = 4{,}2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 200\ \text{g} \cdot 50\ \text{°C} = 42\ \text{kJ}$$

auf. Kann von Energieverlusten z. B. an das Gefäß und an die umgebende Luft abgesehen werden, so erhält man für die vom Tauchsieder verrichtete elektrische Arbeit $W_{el} = Q = 42$ kJ.

Zusammenfassung

Die elektrische Arbeit kann mit Hilfe der abgegebenen Wärme $Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ bestimmt werden. Dabei muss man die Energieverluste vernachlässigen.

I.5. Elektrische Arbeit im Stromkreis

Wir untersuchen nun mit der in *Abb. 9.3.* dargestellten Versuchsanordnung die Abhängigkeit der elektrischen Arbeit W_{el} von der Arbeitszeit t, der Stromstärke I und der Spannung U.

I.5.1. Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Arbeitszeit t

Versuch

Man schaltet die Heizwendeln nach *Abb. 9.2.* und erwärmt im Thermosgefäß eine bestimmte Wasserportion mit der Masse m bei konstanter Spannung U und konstanter Stromstärke I. Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Wassers wird in Abhängigkeit von der Zeit t gemessen. W_{el} wird nach der Formel $W_{el} = Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ berechnet.

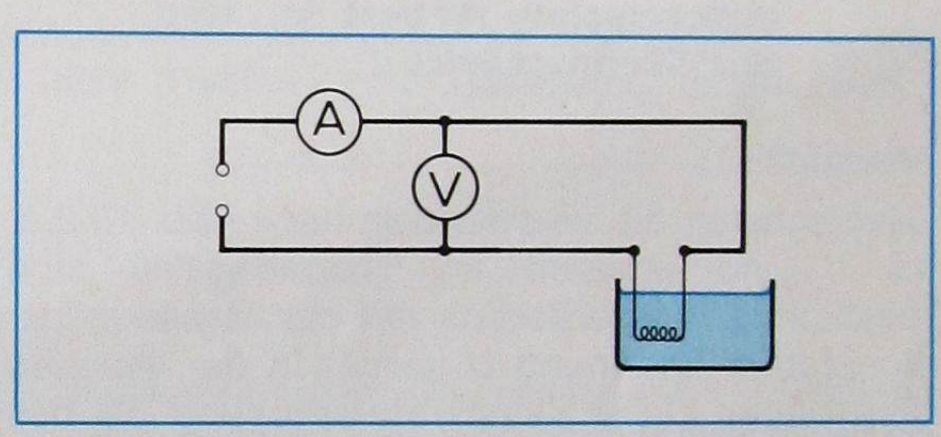


Abb. 9.2. Schaltung der Heizwendeln

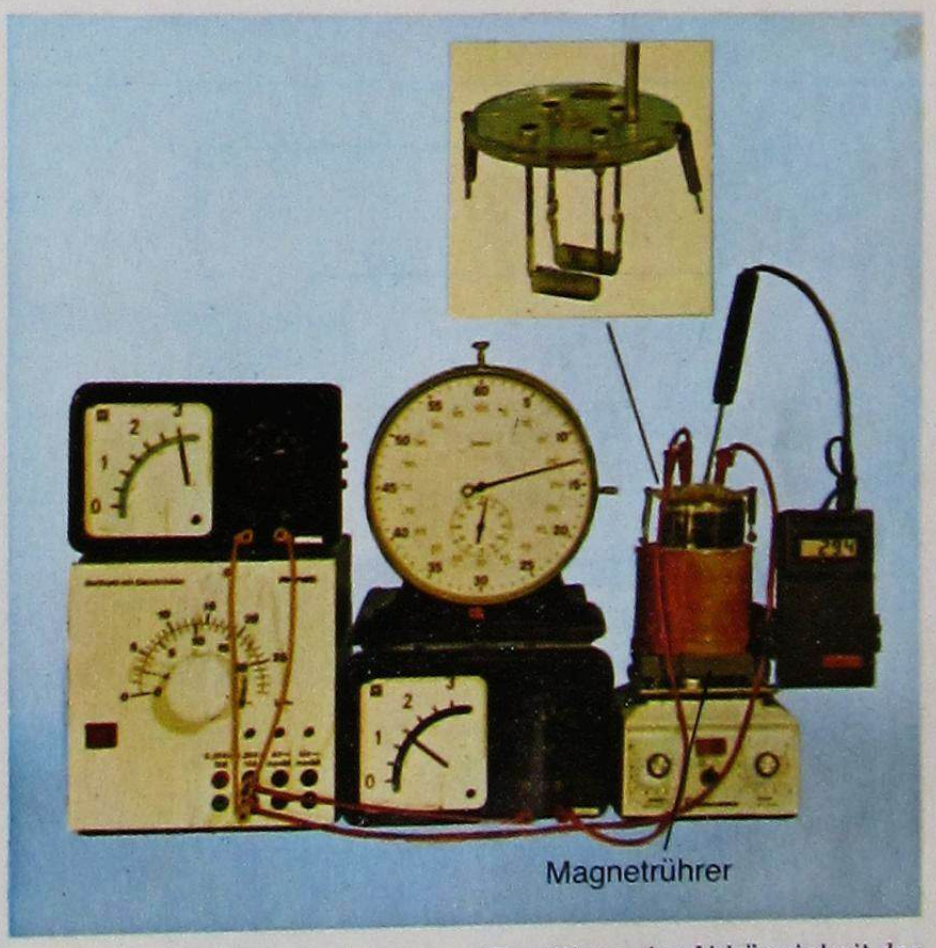


Abb. 9.3. Versuchsanordnung zur Ermittlung der Abhängigkeit der elektrischen Arbeit von der Stromstärke, der Spannung und der Zeit

Ein Messbeispiel mit $m = 150\,g$; $U = 10{,}2\,V$; $I = 6{,}0\,A$ zeigt *Tab. 10.1.*

t in s	ϑ in °C	$\Delta\vartheta$ in °C	W_{el} in kJ	$\frac{W_{el}}{t}$ in $\frac{kJ}{s}$
0	16,5	–	0	–
30	19,4	2,9	1,8	0,060
60	22,2	5,7	3,6	0,060
90	25,1	8,6	5,4	0,060

Tab. 10.1.

Ergebnis. $W_{el} \sim t$ (vgl. 5. Spalte in der *Tab. 10.1.* oder *Abb. 10.1.a.*).

Die elektrische Arbeit ist direkt proportional zur Zeit.

I.5.2. Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Stromstärke I

Versuch

Man schaltet die Heizwendeln nach *Abb. 10.2.a, b, c* und erwärmt im Thermosgefäß eine bestimmte Wasserportion mit der Masse m bei konstanter Spannung U jeweils in der gleichen Zeitspanne t. Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Wassers wird in Abhängigkeit vom Strom I gemessen.

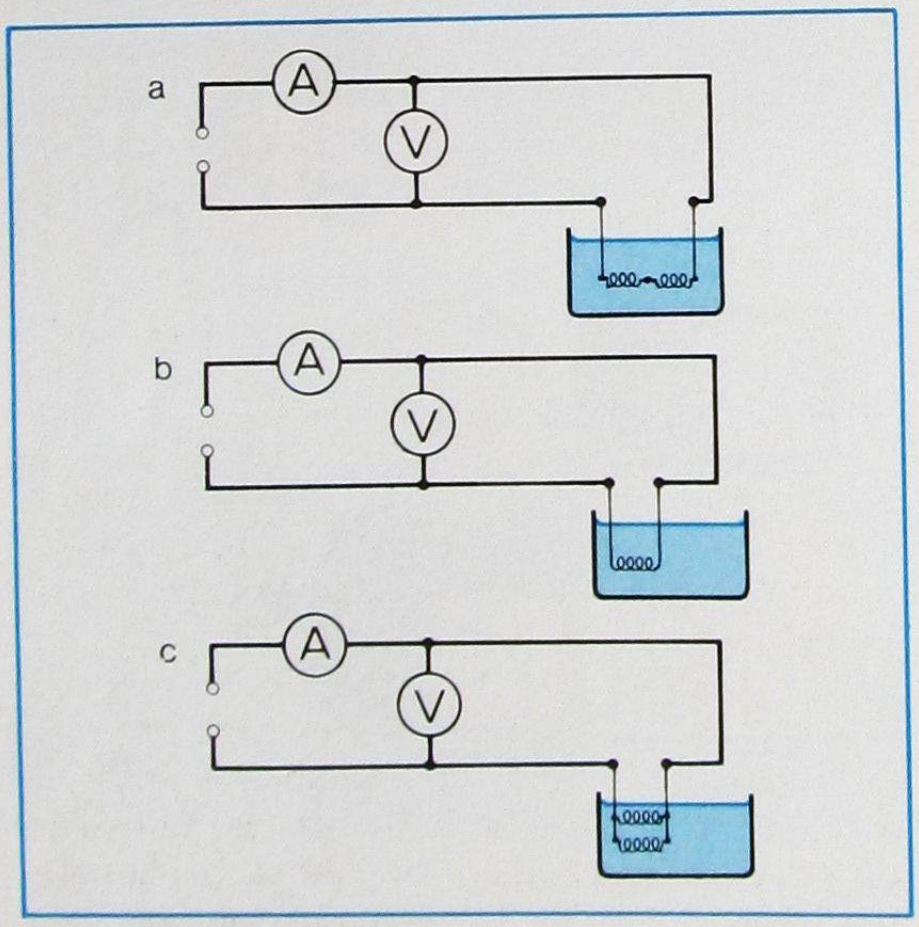


Abb. 10.2. Schaltung der Heizwendeln

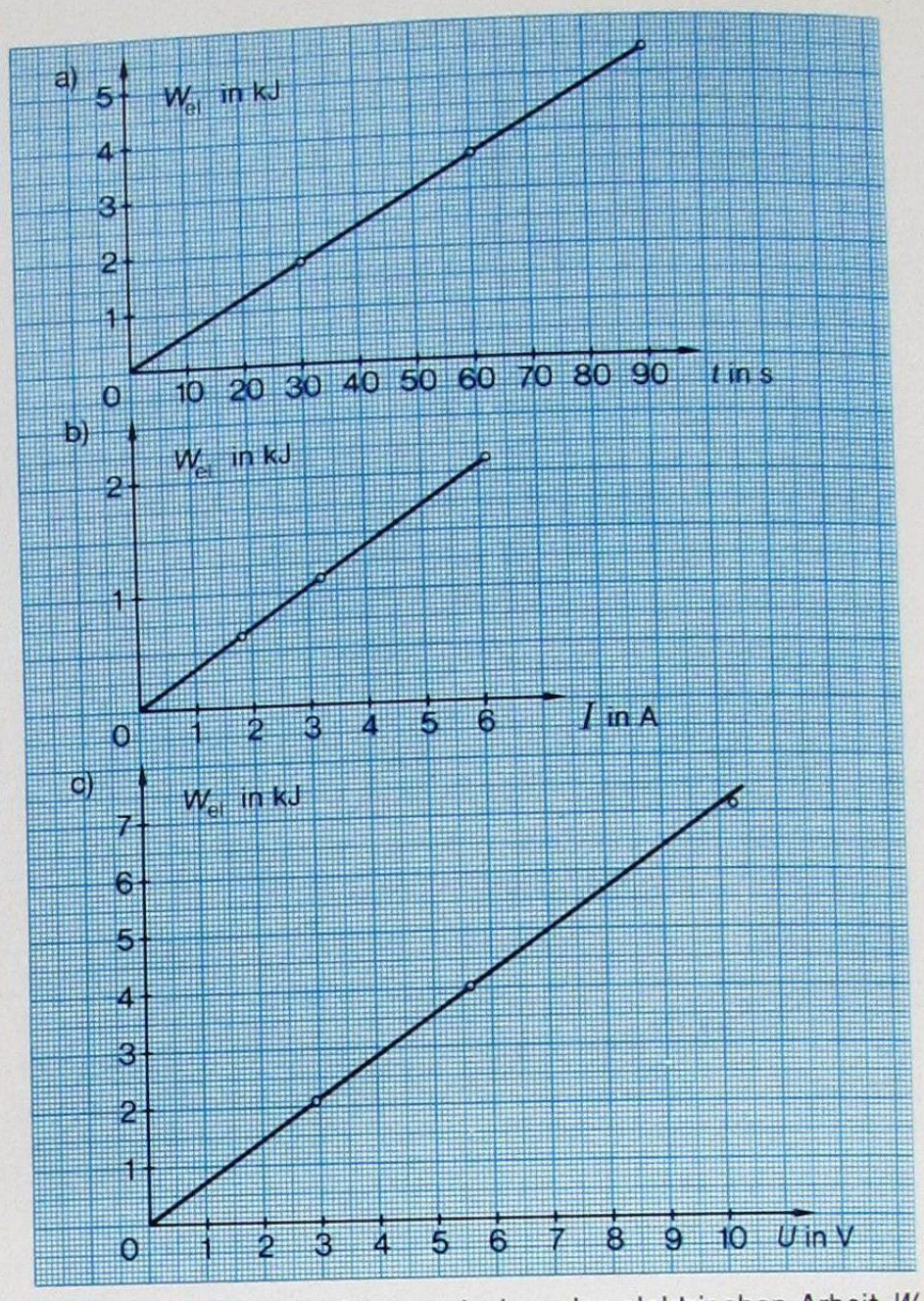


Abb. 10.1. Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Zeit t (oben), der Stromstärke I (Mitte) und der Spannung U (unten)

W_{el} wird wieder nach der Formel $W_{el} = Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ berechnet.

Ein Messbeispiel mit $m = 150\,g$; $U = 3{,}0\,V$; $t = 120\,s$ zeigt *Tab. 10.2.*

I in A	ϑ_A in °C	ϑ_E in °C	$\Delta\vartheta$ in °C	W_{el} in kJ	$\frac{W_{el}}{I}$ in $\frac{kJ}{A}$
0	–	–	–	0	–
1,8	15,0	16,0	1,0	0,63	0,35
3,2	16,1	17,9	1,8	1,1	0,34
6,1	19,5	22,9	3,4	2,1	0,35

Tab. 10.2.

Ergebnis. $W_{el} \sim I$ (vgl. 6. Spalte in *Tab. 10.2.* oder *Abb. 10.1.b.*).

Die elektrische Arbeit ist direkt proportional zur Stromstärke.

I.5.3. Abhängigkeit der elektrischen Arbeit W_{el} von der Spannung U

Versuch

Man schaltet die Heizwendeln nach *Abb. 10.2.c, b, a* und erwärmt eine bestimmte Wasserportion mit der Masse m bei konstanter Stromstärke I jeweils in der gleichen Zeitspanne t. Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Wassers wird in Abhängigkeit von der Spannung U gemessen. W_{el} wird nach der Formel $W_{el} = Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ berechnet.

Ein Messbeispiel mit $m = 150$ g; $t = 120$ s; $I = 6{,}0$ A zeigt *Tab. 11.1.*

U in V	ϑ_A in °C	ϑ_E in °C	$\Delta\vartheta$ in °C	W_{el} in kJ	$\frac{W_{el}}{U}$ in $\frac{kJ}{V}$
0	–	–	–	0	–
2,9	18,2	21,5	3,3	2,1	0,72
5,6	21,7	28,1	6,4	4,0	0,72
10,2	16,5	27,9	11,4	7,2	0,70

Tab. 11.1.

Ergebnis. $W_{el} \sim U$ (vgl. 6. Spalte in *Tab. 11.1.* und *Abb. 10.1.c.*).

Die elektrische Arbeit ist direkt proportional zur Spannung.

Fassen wir die Einzelergebnisse $W_{el} \sim t$, $W_{el} \sim I$ und $W_{el} \sim U$ zusammen, so erhalten wir folgende Gesetzmäßigkeit für die elektrische Arbeit:

$W_{el} \sim U \cdot I \cdot t$

Zusammenfassung

Die elektrische Arbeit ist direkt proportional zum Produkt aus Spannung, Strom und Zeit. $W_{el} \sim U \cdot I \cdot t$

Aufgaben

1. Erkläre die Erwärmung eines Leiters durch den elektrischen Strom.
2. Erkläre, warum bei einem Tauchsieder die Heizspirale heiß wird, die Zuleitungen aber kalt bleiben.
3. Beschreibe Aufbau, Durchführung und Auswertung der Messversuche zur Ermittlung des Gesetzes für die elektrische Arbeit.

I.6. Elektrische Spannung als abgeleitete Größe

Die Proportionalität $W_{el} \sim U \cdot I \cdot t$ kann auch als Größengleichung geschrieben werden: $W_{el} = k \cdot U \cdot I \cdot t$

Die Konstante $k = \frac{W_{el}}{U \cdot I \cdot t}$ ermitteln wir durch Einsetzen zusammengehöriger Messwerte aus einem Teilversuch.

Beispiel

Aus Versuch 1 entnehmen wir $W_{el} = 1{,}8$ kJ; $U = 10{,}2$ V; $I = 6{,}0$ A; $t = 30$ s.

$$k = \frac{1{,}8\ \text{kJ}}{10{,}2\ \text{V} \cdot 6{,}0\ \text{A} \cdot 30\ \text{s}} = 0{,}98 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{kJ}}{\text{VAs}} = 0{,}98\ \frac{\text{J}}{\text{VAs}}$$

Als Mittelwert für die Konstante erhalten wir in unserem Versuchsbeispiel $k = 0{,}98\ \frac{\text{J}}{\text{VAs}}$. Genaue Messungen, bei denen die von uns vernachlässigten Wärmeverluste berücksichtigt werden, ergeben für den Zahlenwert der Konstanten k den Wert 1,00.

Der einfache Zahlenwert 1 für die Konstante k ist kein Zufall. Er hängt mit der Definition der Spannung zusammen. Bisher hatten wir die Einheit der Spannung 1 V einfach durch einen bestimmten Ausschlag eines geeigneten Messgerätes festgelegt, d. h., die Spannung war für uns eine

Grundgröße. Tatsächlich aber wird die Spannung durch die Beziehung $W_{el} = U \cdot I \cdot t$ bzw. $U = \frac{W_{el}}{I \cdot t}$ definiert. Daraus folgt, dass die **Einheit der elektrischen Spannung**

$$\mathbf{1\ V = 1\ \frac{J}{As}}$$

ist. Die Konstante k in der Beziehung $W_{el} = k \cdot U \cdot I \cdot t$ wird zu $k = 1$ und für die elektrische Arbeit gilt:

$$W_{el} = U \cdot I \cdot t$$

Elektrische Arbeit = Spannung · Stromstärke · Zeit

Für die **Einheit der elektrischen Arbeit** folgt daraus:

$$\mathbf{1\ J = 1\ V \cdot 1\ A \cdot 1\ s}$$

Man kann aber auch die aus der Mechanik bekannten Arbeitseinheiten **Newtonmeter** (Nm), **Joule** (J) und **Wattsekunde** (Ws) verwenden, also

$$\mathbf{1\ J = 1\ VAs = 1\ Ws = 1\ Nm}$$

Gebräuchlich ist auch die Einheit Kilowattstunde: $1\ \text{kWh} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{Ws}$, also:

$$\mathbf{1\ kWh = 3{,}6 \cdot 10^6\ Ws = 3{,}6\ MJ}$$

Zusammenfassung

1. Die Spannung ist eine von der Stromstärke, der Zeit und der Arbeit abgeleitete Größe.
2. 1 V ist die Spannung, bei welcher die Stromstärke 1 A die Arbeit 1 J verrichtet.
3. Für die elektrische Arbeit gilt: $W_{el} = U \cdot I \cdot t$
Elektrische Arbeit = Spannung · Stromstärke · Zeit
4. Die Einheit der elektrischen Arbeit ist: 1 J = 1 VAs = 1 Ws = 1 Nm
5. Als weitere Einheit ist die Einheit Kilowattstunde gebräuchlich: 1 kWh = 3,6 · 10^6 Ws = 3,6 MJ

Aufgaben

1. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und
a) der Spannung U,
b) der Stromstärke I und
c) der Zeit t?
Leite die Definitionsgleichung für die elektrische Arbeit her.
2. Welche Einheiten sind für die elektrische Arbeit gebräuchlich?

1.7. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen

Beispiel

Ein Elektromotor mit Getriebe hebt ein Wägestück mit der Gewichtskraft 20 N in 16 s um 1,0 m. Dabei fließt durch den Motor ein Strom von 25 mA bei einer Spannung von 230 V *(Abb. 12.1.)*.

Dem Motor wird die elektrische Energie
$W_{el} = U \cdot I \cdot t = 230\ \text{V} \cdot 0{,}025\ \text{A} \cdot 16\ \text{s} = 92\ \text{VAs} = 92\ \text{J}$
zugeführt. Im Motor verrichtet der elektrische Strom elektrische Arbeit. Dabei wird die elektrische Energie in nutzbare Lageenergie
$W_h = F_G \cdot h = 20\ \text{N} \cdot 1{,}0\ \text{m} = 20\ \text{Nm} = 20\ \text{J}$
und in nicht nutzbare Wärme in den stromdurchflossenen Leitungen sowie im Getriebe und den Achslagern umgesetzt. D. h., die elektrische Energie wird in potentielle Energie des Wägestückes und in innere Energie der Motorteile, der Leitun-

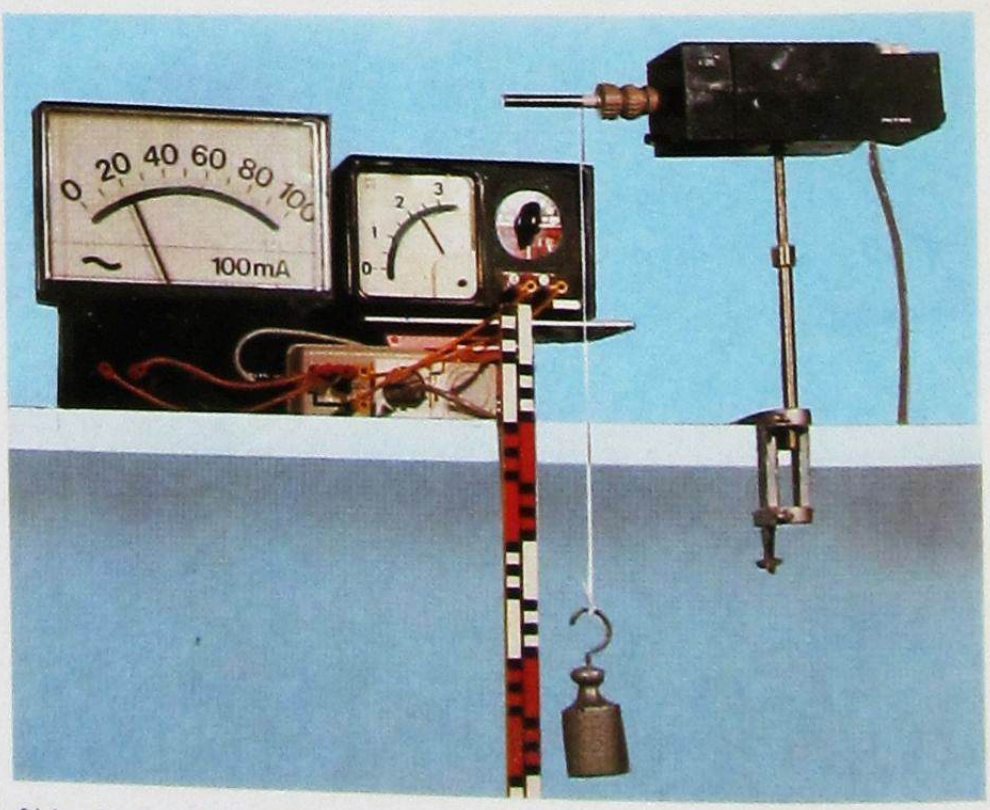


Abb. 12.1. Messversuch zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie

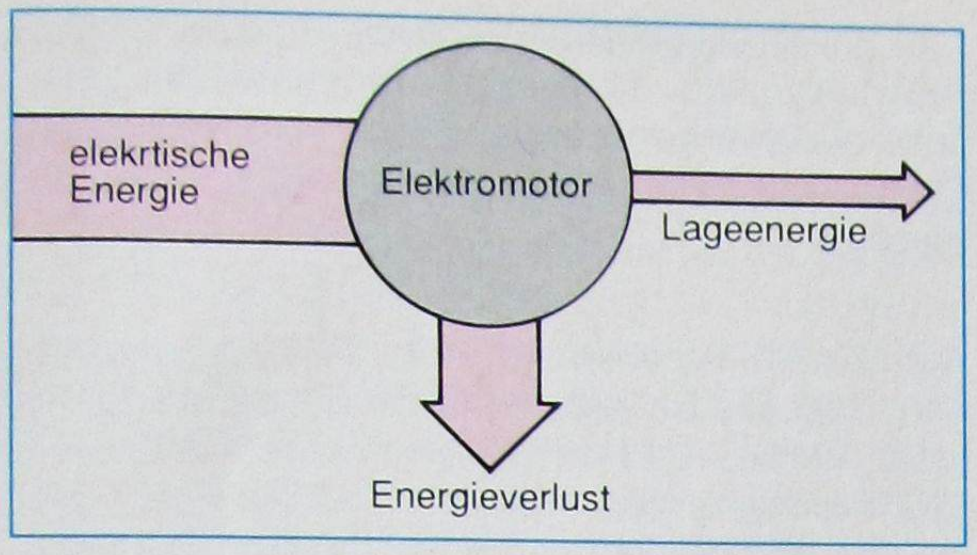


Abb. 13.1. Energiestrom durch einen Elektromotor

gen und auch der umgebenden Luft umgewandelt.
Den nicht nutzbaren Anteil der umgewandelten elektrischen Energie
$\Delta W = W_{el} - W_h = 92\ J - 20\ J = 72\ J$
bezeichnet man auch als **Energieverlust**. Unser Elektromotor mit Getriebe hat den **Wirkungsgrad**

$$\eta = \frac{W_h}{W_{el}} = \frac{20\ J}{92\ J} = 0{,}22 = 22\ \%.$$

Der Energiestrom durch den Elektromotor ist in *Abb. 13.1.* dargestellt.

Die elektrische Energie wird durch Elektrizitätswerke bereitgestellt. Sie kann durch die verschiedenen Elektrogeräte im Haushalt oder in der Industrie in andere Energiearten umgewandelt werden *(Abb. 13.2.)*.

Beispiele

In elektrischen Heizgeräten, Tauchsiedern und Schmelzöfen wird elektrische Energie in **Wärme** umgesetzt. In Geräten und Maschinen, die einen Elektromotor enthalten, wird sie in **mechanische Arbeit** (**potentielle** oder **kinetische Energie**) umgewandelt. In Glüh- und Glimmlampen oder UV-Strahlern entsteht aus ihr **Strahlungsenergie**. **Magnetische Energie** (Elektromagnet, Lautsprecher, Tonbandaufnahmekopf) oder **chemische Energie** (Elektrolyseanlage) sind weitere Energiearten, in die sich die elektrische Energie umwandeln lässt.

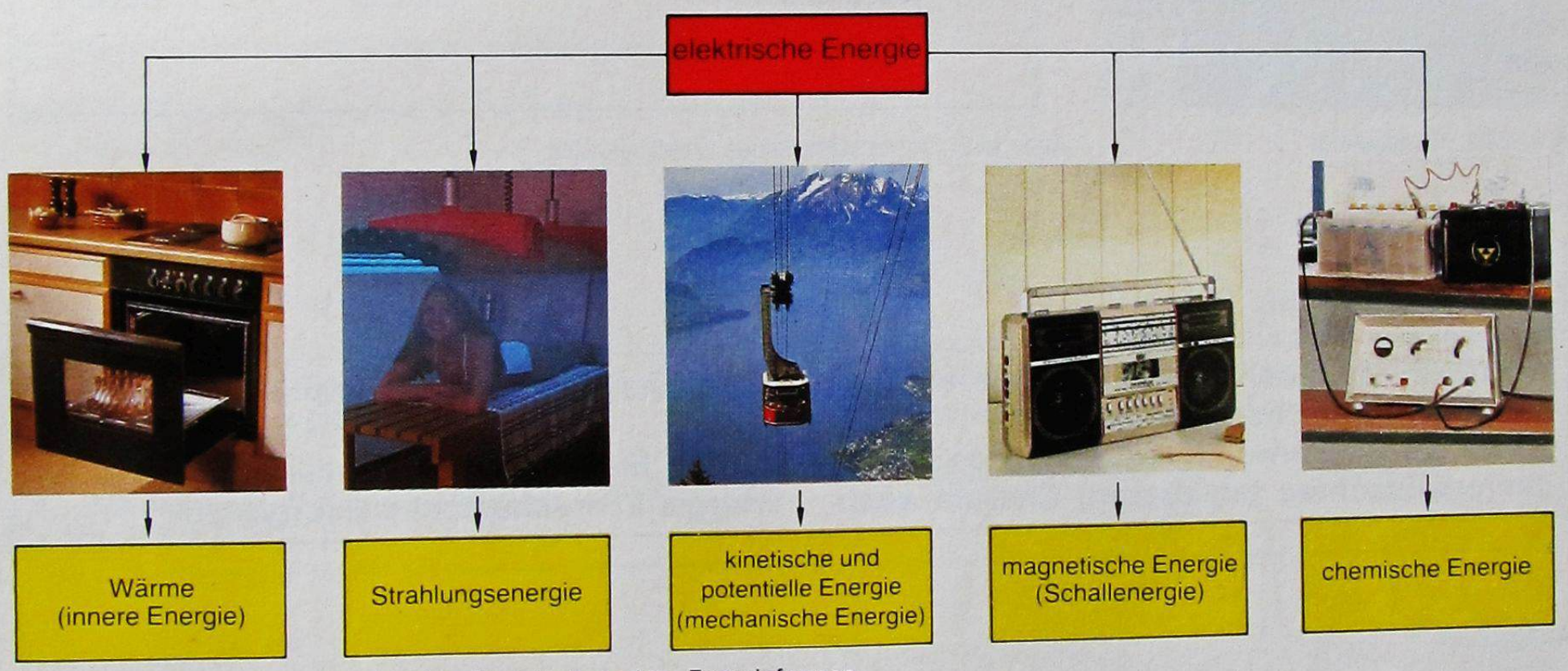
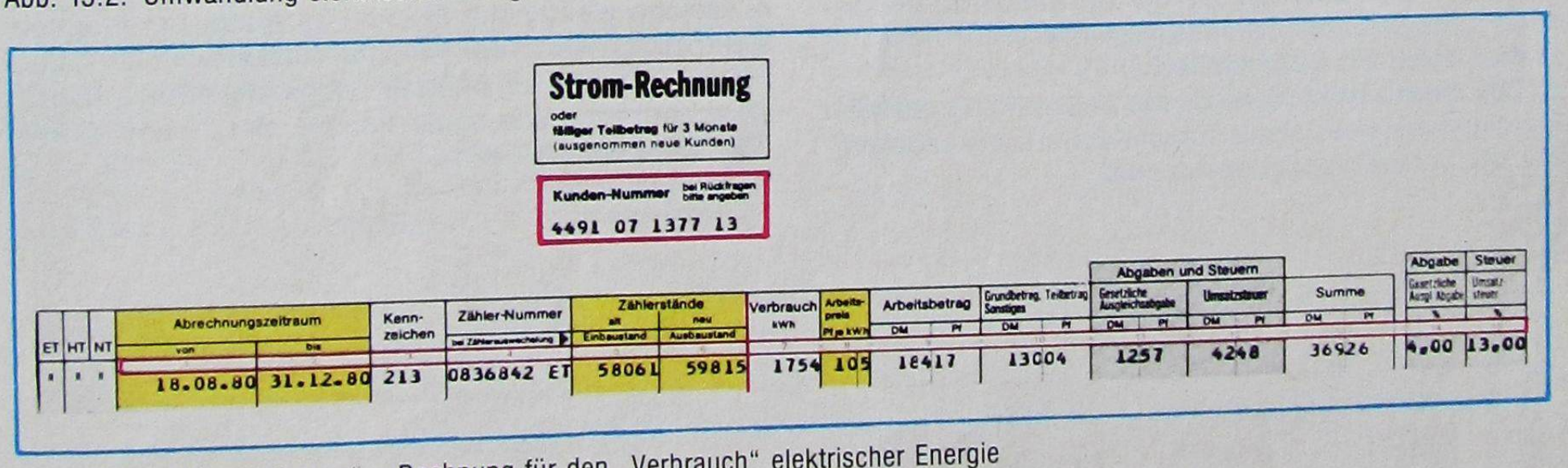


Abb. 13.2. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen



Strom-Rechnung
oder
fälliger Teilbetrag für 3 Monate
(ausgenommen neue Kunden)

Kunden-Nummer bei Rückfragen bitte angeben
4491 07 1377 13

ET	HT	NT	Abrechnungszeitraum von	Abrechnungszeitraum bis	Kennzeichen	Zähler-Nummer bei Zählerauswechslung	Zählerstände alt Einbauland	Zählerstände neu Ausbauland	Verbrauch kWh	Arbeitspreis Pf je kWh	Arbeitsbetrag DM	Arbeitsbetrag Pf	Grundbetrag, Teilbetrag, Sonstiges DM	Grundbetrag, Teilbetrag, Sonstiges Pf	Abgaben und Steuern: Gesetzliche Ausgleichsabgabe DM	Gesetzliche Ausgleichsabgabe Pf	Abgaben und Steuern: Umsatzsteuer DM	Umsatzsteuer Pf	Summe DM	Summe Pf	Abgabe: Gesetzliche Ausgl. Abgabe %	Steuer: Umsatzsteuer %
"	"	"	18.08.80	31.12.80	213	0836842 ET	58061	59815	1754	105	18417		13004		1257		4248		36926		4,00	13,00

Abb. 13.3. „Stromrechnung" – Rechnung für den „Verbrauch" elektrischer Energie

Bei der Umwandlung elektrischer Energie entstehen neben der erwünschten (nutzbaren) Energieart auch unerwünschte Energiearten (Verluste). In einer Glühlampe werden z. B. nur 5 % der umgewandelten elektrischen Energie als Licht abgestrahlt, während der Rest (95 %) in Wärme umgesetzt wird.

In den Elektrogeräten verrichtet der elektrische Strom elektrische Arbeit. Dabei wird elektrische Energie in andere Energiearten umgewandelt.

Das Elektrizitätswerk berechnet in seiner Stromrechnung *(Abb. 13.3.)* dem Abnehmer die gelieferte elektrische Energie. Diese wird von einem Elektrizitätszähler (Stromzähler, *Abb. 14.1.*) gemessen.

Auf seinem Typenschild *(Abb. 14.2.)* ist angegeben, dass die Scheibe im Gerät bei der Abnahme (dem „Verbrauch") von 1 kWh elektrischer Energie 600 Umdrehungen ausführt. Das Zählwerk gibt die vom Kunden abgenommene elektrische Energie an.

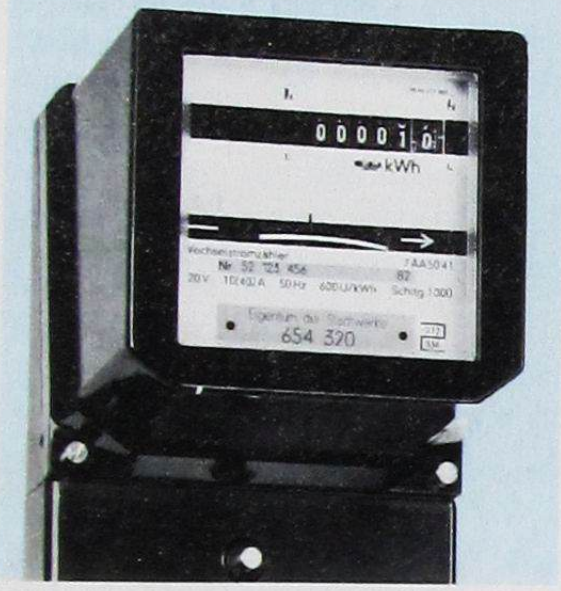


Abb. 14.1. Stromzähler

Volt 230~ Hz 50 Sichg.: HLS Schalter 16 A
Heizung – Motor 2500/200/600/80 Anschlußw. 2700 W
n_{mot} 450/2800 U/min U/Min

Nur für Wechselstrom

Typ
WV 3441 5006 02000

Abb. 14.2. Typenschild eines Elektrogerätes

Zusammenfassung

1. Elektrische Energie kann in andere Energieformen umgewandelt werden.
2. Bei dieser Umwandlung entstehen neben der erwünschten (nutzbaren) Energie auch unerwünschte Energieformen (Energieverluste).
3. Ein Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um.

Aufgaben

1. Beschreibe Beispiele für die Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen.
2. Was misst ein Stromzähler?
3. Beschreibe einen Versuch zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines elektrischen Kochers und erläutere, wie der Versuch ausgewertet wird.
4. Welche elektrische Energie ist nötig, um in einem elektrischen Kochtopf 1,5 Liter Wasser von 12 °C zum Sieden (100 °C) zu bringen, wenn der Wirkungsgrad 80 % beträgt? Wie teuer kommt dies, wenn 1 kWh 0,27 DM kostet?

I.8. Elektrische Leistung

Beispiel

Bei einem Auto gibt es mehrere Glühlampen, die verschieden hell leuchten, obwohl sie mit der gleichen Spannung, der Spannung des Autoakkus, betrieben werden. Beim Kauf einer bestimmten Ersatzlampe muss deswegen nicht nur die **Betriebsspannung**, normalerweise 12 V, sondern auch die **Leistung** der Lampe, z. B. 5 Watt, angegeben werden.

In der Mechanik ist die Leistung P durch den Quotienten aus der verrichteten Arbeit W und der dazu benötigten Zeit t festgelegt: $P = \frac{W}{t}$

Für die elektrische Leistung gilt entsprechend:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

Elektrische Leistung = Spannung · Stromstärke: $P = U \cdot I$

Die **Einheit der elektrischen Leistung** ergibt sich zu: $\mathbf{1\ V \cdot 1\ A = 1\ \frac{J}{As} \cdot A = 1\ \frac{J}{s} = 1\ W}$

Fließt durch ein elektrisches Gerät bei der Spannung 1 V ein Strom von 1 A, so nimmt das Gerät eine Leistung von 1 W auf, d. h.,
1 Watt = 1 Volt · 1 Ampere: 1 W = 1 VA

Für große Leistungen werden häufig die Einheiten **Kilowatt** (kW) und **Megawatt** (MW) verwendet:
$1\ kW = 1 \cdot 10^3\ W$, $1\ MW = 1 \cdot 10^3\ kW = 1 \cdot 10^6\ W$

Auf einem Elektrogerät sind in der Regel die Betriebsspannung und die Leistungsaufnahme angegeben *(Abb. 14.2.)*. Aus der **Betriebsspannung U** und der **Leistungsaufnahme P** des Gerätes kann der **Betriebsstrom $I = \frac{P}{U}$** des Gerätes berechnet werden.

Beispiel

Bei einer 12-V-/5-W-Glühlampe ist der Betriebsstrom

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5{,}0\ W}{12\ V} = 0{,}42\ \frac{VA}{V} = 0{,}42\ A$$

Zusammenfassung

1. Die elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke:
$P = U \cdot I$
2. Die Einheit der elektrischen Leistung ist:
1 VA = 1 W
3. Aus der Betriebsspannung U und der Leistungsaufnahme P eines Gerätes ergibt sich der Betriebsstrom $I = \frac{P}{U}$.

Aufgaben

1. Wie lautet die Definition für die elektrische Leistung? Gib die gebräuchlichen Einheiten für die elektrische Leistung an.
2. Ein Schüler möchte einen „Reisetauchsieder" mit 300 W Leistungsaufnahme für den Anschluss an eine Autobatterie (12 V; 36 Ah) bauen.
a) Welche Überlegungen sind erforderlich?
b) Wie viel Wasser (Anfangstemperatur 18 °C) könnte er mit einer frisch geladenen Batterie zum Sieden (100 °C) bringen?

I.9. Anwendungsbeispiele

Wie unterschiedlich groß die Leistungsaufnahmen elektrischer Geräte sein kann, geht aus der *Tab. 16.1.* hervor.

Quarzuhr	0,00 0001 W
Taschenrechner	0,0003 W
Glühlampen	0,1 W bis 1000 W
Kühlschrank	100 W
Haartrockner	300 W bis 1000 W
Bügeleisen	500 W bis 1500 W
Kochplatte	500 W bis 2000 W
Heizofen	1 kW bis 10 kW
Waschmaschine	3 kW
Geschirrspülmaschine	3 kW
Straßenbahn	100 kW
E-Lokomotive	5000 kW

Tab. 16.1. Beispiele für die Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte

Beispiele

1. Die Angaben auf dem Typenblatt eines Schlagbohrers *(Abb. 16.1.)* ermöglichen es, alle elektrischen Betriebsdaten des Gerätes zu ermitteln.

a) Aus der Leistungsaufnahme $P_{auf} = 600$ W und der Betriebsspannung $U = 230$ V kann man den Betriebsstrom I errechnen:

$$P = U \cdot I;\ I = \frac{P}{U}$$

$$I = \frac{600\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 2{,}61\ \frac{\text{W}}{\text{V}} = 2{,}61\ \frac{\text{VA}}{\text{V}} = 2{,}61\ \text{A}$$

b) Die Leistungsabgabe $P_{ab} = 350$ W ist die für das Schlagbohren bei Volllast zur Verfügung stehende Leistung. Die restliche Leistung $\Delta P = P_{auf} - P_{ab} = 600\ \text{W} - 350\ \text{W} = 250\ \text{W}$ geht in Form von Wärme, erzeugt beim Stromfluss in den Wicklungen des Motors sowie beim Verrichten von Reibungsarbeit zwischen bewegten Maschinenteilen im Inneren des Gerätes, verloren.
Der Wirkungsgrad des Schlagbohrers beträgt

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} \qquad \eta = \frac{350\ \text{W}}{600\ \text{W}} = 0{,}58 = 58\ \%$$

c) Die Angabe „Absicherung 10 A" bedeutet, dass die Maschine automatisch abgeschaltet wird, sobald bei einer Überlastung des Gerätes der Strom 10 A überschritten wird (Verhütung kostspieliger Reparaturen).

2. Ein elektrischer Eierkocher (230 V; 400 W) ist 5,5 min in Betrieb. Wie hoch sind die Kosten hierfür (Strompreis 0,27 DM/kWh)?
Aus der Leistungsaufnahme $P = 400$ W und der Betriebszeit $t = 5{,}5$ min wird zunächst die elektrische Energie berechnet: $W = P \cdot t$
$W = 400\ \text{W} \cdot 5{,}5\ \text{min} = 2{,}2 \cdot 10^3\ \text{Wmin} = 0{,}037\ \text{kWh}$

Mit dem Strompreis von $0{,}27\ \frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ erhält man die Kosten für die elektrische Energie:

$$0{,}27\ \frac{\text{DM}}{\text{kWh}} \cdot W = 0{,}27\ \frac{\text{DM}}{\text{kWh}} \cdot 0{,}037\ \text{kWh} = 0{,}010\ \text{DM}.$$

Abb. 16.1. Schlagbohrer

Typ UBH 2/14 SE „electronic"

Vergleichbare Gerätekennwerte:

Bohr-⌀	
in Beton mit SDS-plus Hammer-Bohrern	4 – 14 mm
in Stahl, Holz und Kunststoff	bis 13 mm
Spannung	230 V
Absicherung	10 A
Leistungsaufnahme	600 W
Leistungsabgabe	350 W
Werkzeugaufnahme	SDS-plus mit Verriegelungsautomatik
Nenndrehzahl	0 – 850 l/min
Schlagzahl bei Nenndrehzahl	0 – 3900 l/min
Maschinengewicht	2,3 kg
Bestellnummer mit Electronic	0611**210**703

Aufgaben

1. Berechne die fehlenden Größen:

	Spannung	Leistung	Strom
	U	P	I
a	230 V	100 W	?
b	6,0 V	?	5,0 A
c	?	3,6 mW	2,4 mA

2. Mit einem elektrischen Bügeleisen (230 V; 1500 W) wird 3 Stunden lang gebügelt. Wie hoch sind hierfür die Energiekosten, wenn für 1 kWh 0,27 DM berechnet werden? (Warum sind in Wirklichkeit die Kosten wesentlich niedriger als die aus den vorgegebenen Werten berechneten Kosten?)

3. Ein elektrischer Heizofen mit der Aufschrift 230 V; 1000 W ist täglich 4 Stunden eingeschaltet. Was kostet sein Betrieb in 30 Tagen, wenn 1 kWh mit 0,27 DM berechnet wird?

4. Jemand vergisst am Abend die Kellerbeleuchtung (vier 60-W-Lampen) auszuschalten und bemerkt dies 8 Stunden später am nächsten Tag. Wie groß ist die vergeudete elektrische Energie und wie teuer kommt diese Vergesslichkeit $\left(\text{Energiepreis } 0{,}27\ \frac{\text{DM}}{\text{kWh}}\right)$?

5. In einem Haushalt ist ein elektrischer Geschirrspüler (230 V; 2000 W) in Betrieb. Darf man zusätzlich noch ein elektrisches Heizgerät (230 V; 1000 W) in diesem Stromkreis betreiben, wenn er nur mit 16 A abgesichert ist?

6. Ein Discman (tragbarer CD-Player) kann über ein Netzgerät am 230-V-Netz betrieben werden. Beim Anschluss des Netzgeräts wird ein Strom mit der Stromstärke 34,8 mA gemessen. Auf dem Typenschild des CD-Players sind als Output die Werte 6 V und 500 mA angegeben.
Wie hoch ist die Leistungsaufnahme des CD-Players und wie groß ist der Wirkungsgrad des Netzgeräts?
Welche Energie wird dem Netz bei einem täglichen vierstündigen Betrieb in 30 Tagen entnommen und wie teuer ist dieser Betrieb, wenn 1 kWh mit 0,27 DM berechnet wird?

2. Ohmsches Gesetz, elektrischer Widerstand

2.1. Ohmsches Gesetz

Ändern wir die an einer Glühlampe anliegende elektrische Spannung, so ändert sich die Helligkeit der Lampe; d. h., der elektrische Strom im Glühdraht wird größer oder kleiner. Wir untersuchen, ob zwischen der an den Enden eines Leiters anliegenden Spannung U und der Stromstärke I im Leiter ein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht.

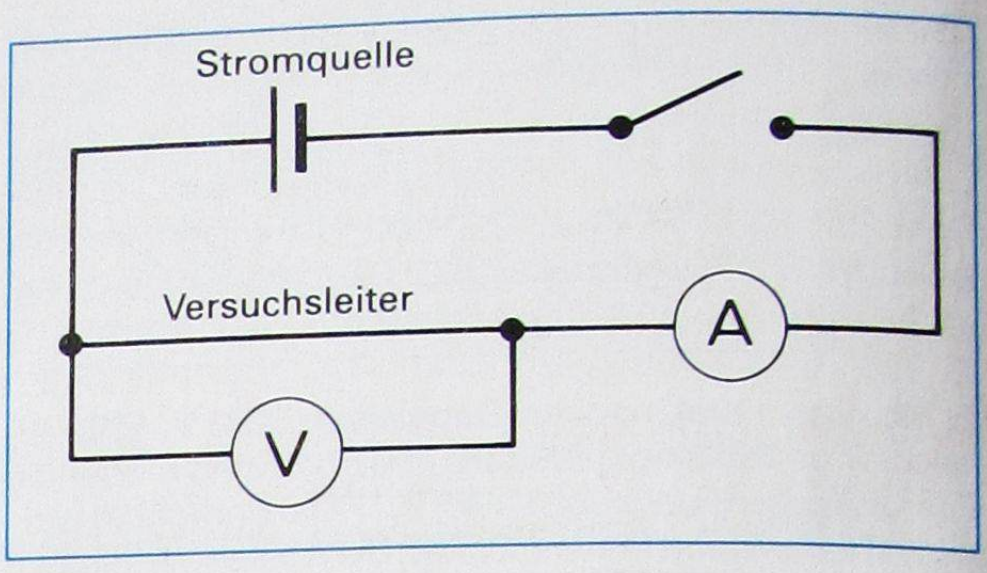


Abb. 18.1. Widerstandsmessung

Versuch

Wir messen die Stromstärke I in Abhängigkeit von der Spannung U für einen Eisendraht, zwei verschiedene Konstantandrähte und einen Kohlestift (Bleistiftmine). Dazu schalten wir an eine Stromquelle mit variabler Spannung ein Strommessgerät und den Versuchsleiter in Reihe; parallel zum Versuchsleiter legen wir einen Spannungsmesser *(Abb. 18.1.)*. Wir erhöhen die Spannung U schrittweise und messen jedesmal die zugehörige Stromstärke I *(Tab. 18.1.)*.

Beobachtung. Tragen wir die Messwerte in ein U-I-Diagramm ein, so erkennen wir aus dem Verlauf der einzelnen Graphen *(Abb. 18.2.)*, dass mit der Erhöhung der Spannung U bei allen vier Versuchsleitern die Stromstärke I zunimmt. Bei den Konstantandrähten liegen die Messpunkte auf einer *Ursprungsgeraden*; die Stromstärke I und die Spannung U sind bei diesen Leitern *direkt proportional* zueinander. Beim Eisendraht und Kohlestab ergeben die Graphen keine Geraden; zwischen der Stromstärke I und der Spannung U besteht bei diesen Leitern im untersuchten Messbereich keine direkte Proportionalität. Bei der Erhöhung der Spannung erhöht sich die Stromstärke beim Eisendraht immer weniger, beim Kohlestab dagegen immer stärker als bei einer direkten Proportionalität. So ergibt sich im U-I-Diagramm für jeden Leiter eine charakteristische Linie. Sie wird **Leiterkennlinie** genannt *(Abb. 18.2.)*.

Sind bei einem Leiter die Spannung U und die Stromstärke I direkt proportional zueinander, so gilt für diesen Leiter das **ohmsche Gesetz**:

Die Spannung U zwischen den Enden des Leiters und die Stromstärke I im Leiter sind direkt proportional zueinander: $U \sim I$

U in V	I in A			
	Eisen-draht	Konstantandraht 1	Konstantandraht 2	Kohle-stab
0	0	0	0	0
1,2	0,19	0,13	0,063	0,24
2,4	0,36	0,25	0,13	0,49
3,6	0,48	0,38	0,19	0,75
4,8	0,58	0,51	0,25	1,04
6,0	0,63	0,63	0,32	1,36
7,2	0,67	0,77	0,38	1,70
8,4	0,69	0,88	0,44	2,20

Tab. 18.1. Messreihe

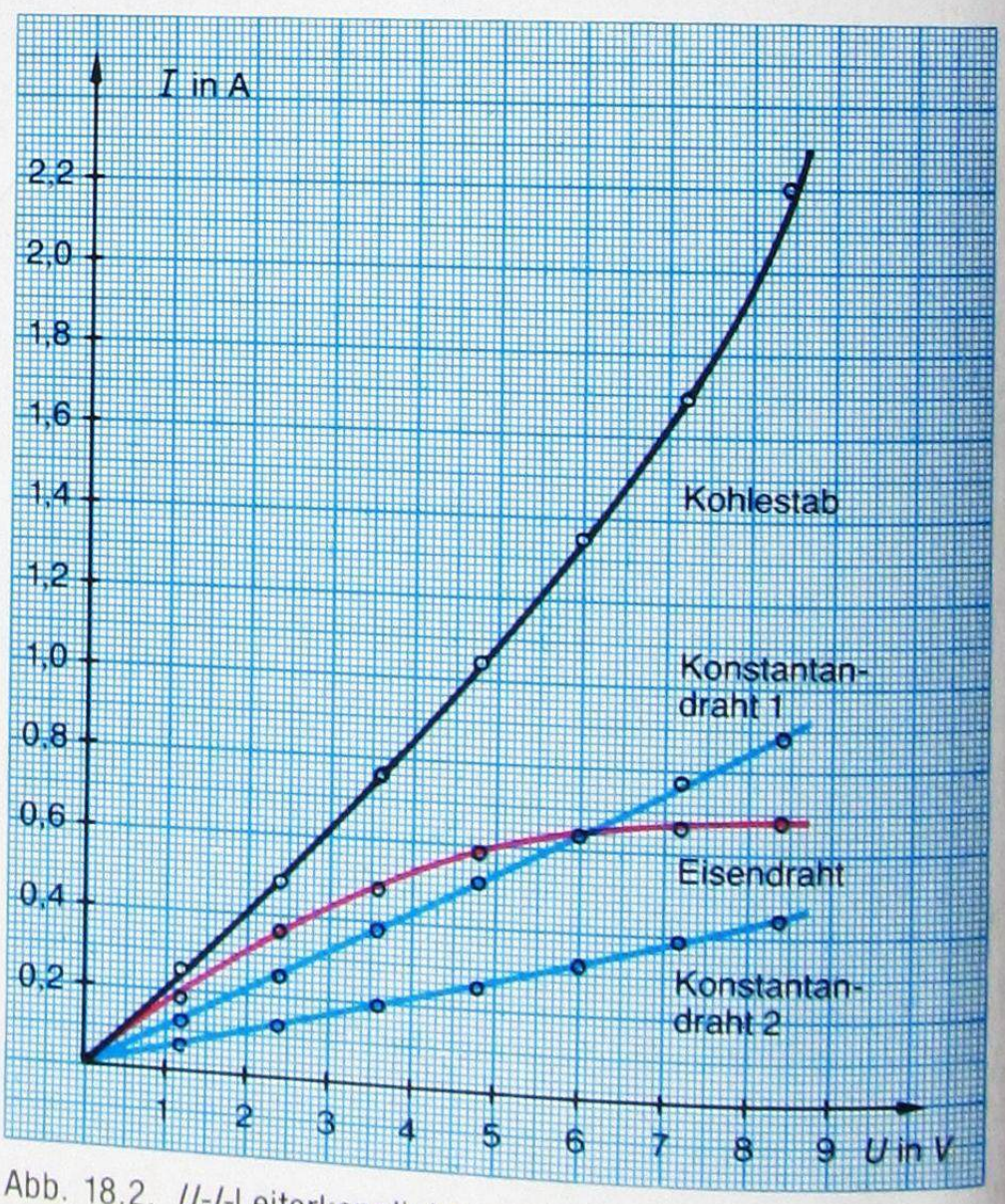


Abb. 18.2. U-I-Leiterkennlinien

GEORG SIMON OHM (1789 bis 1854, *Abb. 21.3.*) entdeckte im Jahre 1826 nach einer Vielzahl von systematisch durchgeführten Versuchen den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Stromstärke *I* und der Spannung *U*.

Das ohmsche Gesetz gilt normalerweise bei festen und flüssigen Leitern unter bestimmten Bedingungen (vgl. Kap. 2.3., S. 22); Gase erfüllen es im Allgemeinen nicht.

Aufgaben

1. Worüber gibt die Kennlinie eines Leiters Auskunft?
2. Beschreibe den Versuch zur Aufnahme der Kennlinie eines Eisendrahtes.
3. Skizziere und erläutere die Kennlinie eines Konstantandrahtes, eines Eisendrahtes, eines Kohlestabes.
4. a) Wie lautet das ohmsche Gesetz?
b) Für welche Leiter ist es gültig?

Zusammenfassung

1. Das *U-I*-Diagramm eines Leiters wird Kennlinie genannt.
2. Das ohmsche Gesetz lautet: Die Spannung *U* zwischen den Enden eines Leiters und die Stromstärke *I* im Leiter sind zueinander direkt proportional: $U \sim I$

2.2. Elektrischer Widerstand

2.2.1. Definition des elektrischen Widerstandes

Die Ströme, die bei verschiedenen Leitern bei einer bestimmten Spannung fließen, sind im Allgemeinen verschieden groß *(Abb. 18.2.)*. Die Leiter hemmen mehr oder weniger stark den Stromfluss, d. h., sie setzen dem elektrischen Strom offenbar unterschiedliche Widerstände entgegen. Der Widerstand ist umso größer, je geringer die Stromstärke bei einer bestimmten Spannung ist. So ist z. B. bei der Spannung $U = 6$ V der Widerstand des Konstantandrahtes Nr. 2 größer als der des Eisendrahtes, des Konstantandrahtes Nr. 1 und des Kohlestabes. Der Eisendraht und der Konstantandraht Nr. 1 haben bei $U = 6$ V einen etwa gleich großen Widerstand; unter 6 V ist der Widerstand des Eisendrahtes geringer, über 6 V ist er größer als der des Konstantandrahtes Nr. 1.

Bildet man aus zusammengehörigen Messwerten für *U* und *I* die Quotienten $\frac{U}{I}$ *(Tab. 19.1.)*, so zeigt der Vergleich, dass sie bei denjenigen Leitern die größeren Werte aufweisen, denen auch die größeren Widerstände zugeschrieben werden. Im Konstantandraht Nr. 2 ist bei jeder Spannung die Stromstärke halb so groß wie im Konstantandraht Nr. 1 (*U-I*-Diagramm, *Abb. 18.2.*).
Wir sagen deshalb: Der Konstantandraht Nr. 2 besitzt einen doppelt so großen Widerstand wie der Konstantandraht Nr. 1.

Da auch der Quotient $\frac{U}{I}$ beim Konstantandraht Nr. 2 doppelt so groß ist wie beim Konstantandraht Nr. 1, ist es sinnvoll, mit dem Quotienten $\frac{U}{I}$ den **elektrischen Widerstand** (Formelzeichen *R*) festzusetzen.

Der elektrische Widerstand *R* eines Leiters ist der Quotient aus der an seinen Enden anliegenden Spannung *U* und der Stromstärke *I* in dem Leiter.

Die Definition $R = \frac{U}{I}$ gilt für den elektrischen Widerstand sowohl im Gleichstromkreis als auch im Wechselstromkreis.

Quotient $\frac{U}{I}$ in $\frac{\text{V}}{\text{A}}$			
Eisendraht	Konstantandraht 1	Konstantandraht 2	Kohlestab
–	–	–	–
6,3	9,2	19	5,0
6,7	9,6	19	4,9
7,5	9,5	19	4,8
8,3	9,4	19	4,6
9,5	9,5	19	4,4
11	9,4	19	4,2
12	9,5	19	3,8

Tab. 19.1.

Die **Einheit für den elektrischen Widerstand** ergibt sich aus seiner Definitionsgleichung: $R = \frac{U}{I}$ zu $1\ \frac{V}{A}$. Die Einheit hat zu Ehren von GEORG SIMON OHM den Namen **1 Ohm (1 Ω)** erhalten, also $1\ \Omega = 1\ \frac{V}{A}$. Ein Leiter besitzt den Widerstand 1 Ω, wenn bei einer Spannung $U = 1$ V zwischen den Enden des Leiters die Stromstärke $I = 1$ A im Leiter fließt.

In der Praxis werden auch dezimale Vielfache der Einheit 1 Ω verwendet: *Kiloohm* (kΩ), *Megaohm* (MΩ).

$1\ k\Omega = 1 \cdot 10^3\ \Omega$; $1\ M\Omega = 1 \cdot 10^6\ \Omega$.

In *Tab. 19.1.* sind die Widerstände unserer Versuchsleiter angegeben. Während die Widerstände der Konstantandrähte jeweils konstant sind, ändern sie sich beim Eisendraht und beim Kohlestab.

Für einen Leiter mit konstantem Widerstand gilt das ohmsche Gesetz $U \sim I$ oder $\frac{U}{I}$ = konstant, für einen Leiter, bei dem sich der Widerstand mit der Stromstärke ändert, dagegen nicht. Es ist deshalb notwendig, die Definition des elektrischen Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ von dem ohmschen Gesetz $U \sim I$ oder $\frac{U}{I}$ = konstant zu unterscheiden.

2.2.2. Bestimmung von Widerständen

Soll der Widerstand R eines Leiters, z. B. einer leuchtenden Glühbirne, experimentell bestimmt werden, so misst man Spannung U und Strom I nach dem in *Abb. 20.1.* dargestellten Schaltplan. Der Widerstand R wird durch den Quotienten der Messwerte berechnet: $R = \frac{U}{I}$.

Beispiel

Messwerte: $U = 3{,}8$ V; $I = 0{,}30$ A; $R = \frac{U}{I}$; $R = \frac{3{,}8\ V}{0{,}30\ A}$;

$R = 13\ \Omega$

Bei der Berechnung des Widerstandes ist auf eine sinnvolle Stellenzahl des Ergebnisses zu achten. Den berechneten Widerstand mit $R = 12{,}67\ \Omega$ oder $R = 12{,}7\ \Omega$ anzugeben, wäre falsch. Diese Werte würden eine zu hohe Genauigkeit vorgaukeln, da die Messergebnisse nur auf zwei Stellen vorgegeben sind.

Vielfachmessinstrumente haben oft eine besondere Schalterstellung zur „direkten" Messung eines Widerstandes. Bei diesen Einstellungen wird die im Instrument vorhandene Batterie an den Leiter angeschlossen und der Strom gemessen. Daraus „ermittelt" das Gerät den Widerstand und zeigt ihn an.

Anwendungsbeispiele

1. Welchen Widerstand besitzt eine Glühlampe, die an das 230-V-Netz angeschlossen ist und von einem Strom $I = 0{,}20$ A durchflossen wird?

Lösung: geg.: $U = 230$ V, $I = 0{,}20$ A; ges.: R

$R = \frac{U}{I}$; $R = \frac{230\ V}{0{,}20\ A}$; $R = 1{,}15 \cdot 10^3\ \Omega$.

Durch Umformung der Beziehung $R = \frac{U}{I}$ in $U = R \cdot I$ oder $I = \frac{U}{R}$ kann die Spannung U bzw. die Stromstärke I berechnet werden, falls die beiden anderen Größen jeweils gegeben sind.

2. Welche Spannung muss zwischen den Enden eines Leiters mit einem Widerstand von 45 Ω anliegen, damit im Leiter ein Strom von 0,55 A fließt?

Lösung: geg.: $R = 45\ \Omega$, $I = 0{,}55$ A; ges.: U

$U = R \cdot I$; $U = 45\ \Omega \cdot 0{,}55$ A; $U = 25$ V

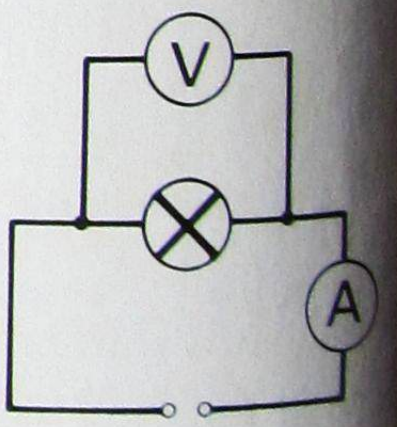


Abb. 20.1. Schaltbild zur Bestimmung des Widerstandes einer Glühbirne

Zusammenfassung

1. Der elektrische Widerstand R eines Leiters ist der Quotient aus angelegter Spannung U und Stromstärke I im Leiter: $R = \frac{U}{I}$

2. Die Einheit des elektrischen Widerstands ist 1 Ohm: $1\Omega = \frac{1\ V}{1\ A}$

Aufgaben

1. Was ist anhand der Leiterkennlinien *(Abb. 18.2.)* über den Widerstand der Konstantandrähte, des Eisendrahtes und des Kohlestabes auszusagen?

2. Beschreibe anhand eines Schaltbildes die experimentelle Bestimmung des Widerstandes R eines elektrischen Gerätes mit Hilfe einer Strom- und Spannungsmessung.

3. Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers beträgt von einer Hand über den Oberkörper zur anderen Hand unter ungünstigen Umständen etwa 1,0 kΩ. Welche Spannung ist bereits lebensgefährlich, wenn ein Strom von 15 mA schon tödliche Wirkungen haben kann?

4. Welche maximale Spannung kann mit einem Strommessgerät (R = 3000 Ω) gemessen werden, das bei Vollausschlag einen Strom I = 10 mA anzeigt?

5. Für die elektrische Leistung $P = I \cdot U$ gelten auch die folgenden Beziehungen: $P = I^2 \cdot R$ und $P = \frac{U^2}{R}$. Begründung?

6. Übertrage die Beziehung für die elektrische Leistung P von Aufgabe 5. auf die elektrische Energie $W_{el} = U \cdot I \cdot t$. Welche Beziehungen ergeben sich?

7. Aus der Formel $W = I^2 \cdot R \cdot t$ darf man nicht den (falschen) Schluss ziehen, dass in einer Glühlampe für eine bestimmte Betriebsspannung (z. B. 230 V) umso mehr elektrische Energie umgesetzt wird, d. h., dass sie umso mehr Licht (und Wärme) spendet, je größer ihr Widerstand ist. Gerade das Gegenteil ist der Fall. Wächst der Widerstand R, so nimmt nach der Formel $I = \frac{U}{R}$ der Strom ab.

Berechne mit Hilfe der Formel $P = \frac{U^2}{R}$ die Betriebswiderstände R für 230-V-Glühlampen mit der Leistung 15 W, 25 W, 40 W, 60 W, 75 W und 100 W. Stelle die Leistungsaufnahme für 230-V-Glühlampen in Abhängigkeit von ihrem Betriebswiderstand R graphisch dar und erläutere das Diagramm.

8. Darf ein 100-Ω-Widerstand, der für eine Belastbarkeit bis 300 W gebaut ist, an die Netzspannung 230 V angeschlossen werden?

Aus der Geschichte der Physik: Georg Friedrich Ohm und der elektrische Widerstand

Im Jahr 1800 hatte der italienische Physiker Alessandro Guiseppe Volta (*Abb. 21.1.*, 1745 bis 1827) die erste elektrische Batterie gebaut.
Im Jahr 1820 wurde der Elektromagnetismus entdeckt, aber die Elektrizitätsleitung konnte man noch nicht erklären.
Erste Anhaltspunkte dazu lieferte der französische Mathematiker Jean-Baptiste-Joseph de Fourier (*Abb. 21.2.*, 1768 bis 1830), der allerdings die Wärmeleitung theoretisch beschrieb. Wie er herausfand, hängt der Wärmefluss zwischen zwei Punkten von den Temperaturen der zwei Punkte und der Wärmeleitfähigkeit des dazwischen liegenden Materials ab.
Ähnlich nahm man für den elektrischen Stromfluss an, dass er vom elektrischen Potential zwischen beiden Punkten (der Spannung, die zwischen diesen Punkten herrscht) und der elektrischen Leitfähigkeit des Materials zwischen diesen Punkten abhängt.

Georg Simon Ohm (*Abb. 21.3.*, 1789 bis 1854) führte dazu Experimente mit Drähten unterschiedlicher Länge und Dicke durch.

Abb. 21.1. Alessandro Volta

Abb. 21.2. J.-B. de Fourier

Abb. 21.3. Georg S. Ohm

2.3. Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leiters von seiner Temperatur

Versuch

Wir schalten einen Eisendraht und ein Strommessgerät in einen Stromkreis bei konstanter Spannung und messen die Stromstärke. Dann erhitzen wir den Draht mit einer Flamme und beobachten den Zeiger des Strommessers *(Abb. 22.1.)*. Wir wiederholen den Versuch mit einem Konstantandraht.

Beobachtung. Beim Erhitzen des Eisendrahtes sinkt die Stromstärke. Da die Spannung dabei konstant bleibt, ist zu folgern, dass der elektrische Widerstand des Drahtes mit steigender Temperatur zunimmt. Beim Abkühlen des Drahtes steigt die Stromstärke wieder an; der Widerstand des Drahtes nimmt folglich ab.

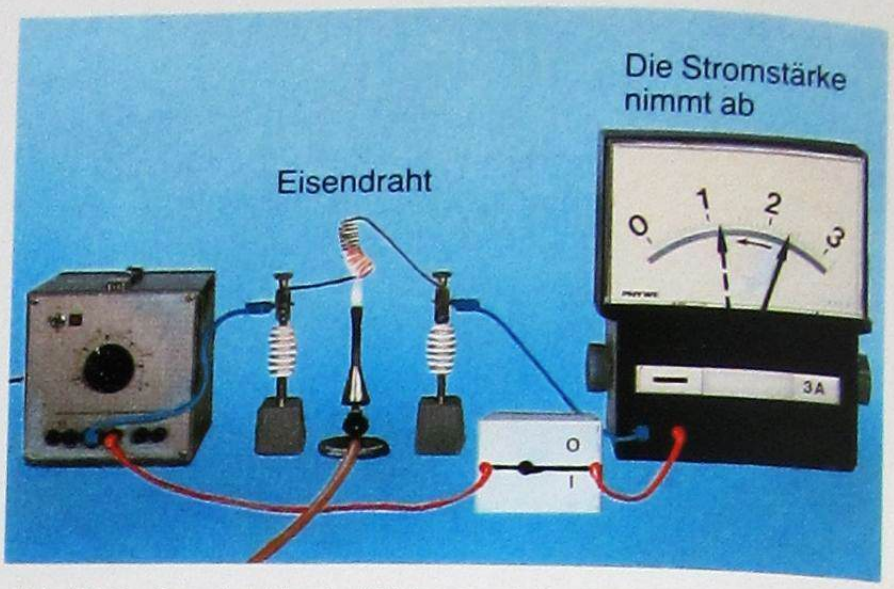


Abb. 22.1. Der elektrische Widerstand des Eisendrahtes nimmt mit steigender Temperatur zu.

Entsprechende Versuche mit anderen metallischen Leitern zeigen im Allgemeinen ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes. Bei bestimmten Legierungen, z. B. bei Konstantan (58 % Kupfer, 41 % Nickel, 1 % Mangan), ändert sich der elektrische Widerstand bei Temperaturänderungen praktisch nicht.

Widerstandsmessungen mit Kohle und Elektrolyten ergeben, dass deren Widerstände mit steigender Temperatur abnehmen. Da der elektrische Strom in metallischen Leitern eine Erwärmung hervorruft, ändert sich der elektrische Widerstand eines Metalldrahtes mit der Stromstärke im Draht (ausgenommen z. B. Konstantandraht). So fließt z. B. unmittelbar nach dem Einschalten einer Glühlampe (kalter Zustand der Wendel) ein stärkerer elektrischer Strom durch die Wendel als danach (im heißen Zustand der Wendel), da durch die vom elektrischen Strom verursachte Temperaturerhöhung der elektrische Widerstand des Drahtes zunimmt. Erst wenn die glühende Wendel so viel Wärme an die Umgebung abgeben kann, dass ihre Temperatur unverändert bleibt, ist der elektrische Widerstand der Glühwendel konstant. Die Lampe leuchtet dann mit einer bestimmten Helligkeit.

Das ohmsche Gesetz $U \sim I$ gilt nur, wenn der Widerstand des Leiters konstant ist. Dazu muss bei den meisten metallischen Leitern die Temperatur unverändert bleiben.

Die Zunahme des elektrischen Widerstandes eines Drahtes bei Temperaturerhöhung lässt sich mit Hilfe unserer einfachen Vorstellung über den elektrischen Strom in Metallen deuten. Wird der Metalldraht von außen oder durch den elektrischen Strom erwärmt, so nimmt die Heftigkeit der Eigenbewegung der Gitter-Ionen und damit auch die Größe ihrer Schwingweiten um ihre Gleichgewichtslagen zu. Die freien Elektronen treten bei ihrer Driftbewegung häufiger mit Gitter-Ionen in Wechselwirkung. Dadurch wird der Stromfluss stärker gehemmt, d. h., der Widerstand des Drahtes ist größer.

Zusammenfassung

1. Der elektrische Widerstand der meisten metallischen Leiter nimmt mit steigender Temperatur zu.
2. Bei diesen Leitern gilt nur dann das ohmsche Gesetz, wenn die Temperatur konstant bleibt.
3. Bei einigen Legierungen (z. B. bei Konstantan) ist der Widerstand weitgehend temperaturunabhängig.

2.4. Spezifischer Widerstand

Will man die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von den geometrischen Abmessungen und dem Material des Leiters untersuchen, muss man dafür sorgen, dass sich der Widerstand des Leiters nicht mit der Temperatur ändert. Deshalb wird in den folgenden Versuchen Konstantan verwendet. Wir untersuchen zuerst die Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge des Leiters.

Versuche

1. Wir schalten Konstantandrähte mit verschiedenen Längen, aber gleichen Querschnittsflächen ($A = 0{,}20\ mm^2$) nacheinander in einen Stromkreis nach *Abb. 23.1.* Wir messen die Stromstärke I und die Spannung U und berechnen daraus den Widerstand R der Drähte. Man kann aber auch direkt den Widerstand R mit Hilfe eines Widerstandmessers bestimmen. Ein mögliches Ergebnis zeigen die ersten vier Zeilen der *Tab. 24.1.*
Ergebnis. Wenn man R gegen l aufträgt *(Abb. 23.2.)*, dann liegen die Messwerte etwa auf einer **Ursprungsgeraden**, ein Hinweis, dass R und l direkt proportional zueinander sind. Zur Kontrolle bilden wir die Quotienten $\frac{R}{l}$; sie sind konstant (fünfte Zeile der *Tab. 24.1.*); dann erkennen wir:

Der elektrische Widerstand eines Drahtes ist direkt proportional zur Drahtlänge: $R \sim l$

Je länger ein Leiter ist, einen desto größeren Widerstand setzt er dem Stromfluss entgegen. Es spielt dabei keine Rolle, ob der Draht z. B. zu einer Spule gewickelt, gewendelt oder gerade ist; entscheidend für den elektrischen Widerstand des Drahtes ist seine Länge.

Nun untersuchen wir die Abhängigkeit des Widerstandes von der Querschnittsfläche des Leiters.

2. Wir schalten Konstantandrähte mit verschiedenen Querschnittsflächen ($A = r^2 \cdot \pi$), aber gleichen Längen ($l = 1{,}0$ m), nacheinander in einen Stromkreis und bestimmen den Widerstand R jedes Leiters *(Tab. 24.2.)*.
Wie im Versuch 1. werten wir die Messergebnisse durch eine graphische Darstellung und durch eine Kontrollrechnung aus.
Ergebnis. Diesmal liegen aber die Punkte angenähert auf einer **Hyperbel** *(Abb. 23.3.)*, und die Produkte der Größen R und A sind konstant (vgl. die sechste Zeile der *Tab. 24.2.*). Daraus erhält man:

Der elektrische Widerstand eines Drahtes ist umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche des Leiters: $R \sim \frac{1}{A}$

Je größer die Querschnittsfläche des Leiters ist, einen desto kleineren Widerstand setzt er dem Stromfluss entgegen. Die Form der Fläche kann beliebig sein, z. B. kreisförmig oder quadratisch; der elektrische Widerstand des Drahtes hängt nur von der Größe des Flächeninhaltes ab.

Schließlich untersuchen wir die Abhängigkeit des Widerstandes vom Material des Leiters.

3. Wir schalten Drähte aus verschiedenem Material, jedoch mit gleichen Längen ($l = 1$ m) und Querschnittsflächen ($A = 0{,}20\ mm^2$), nacheinander in einen Stromkreis und bestimmen jeweils den Widerstand R. Ein Beispiel einer Messung zeigt die *Tab. 24.3.*

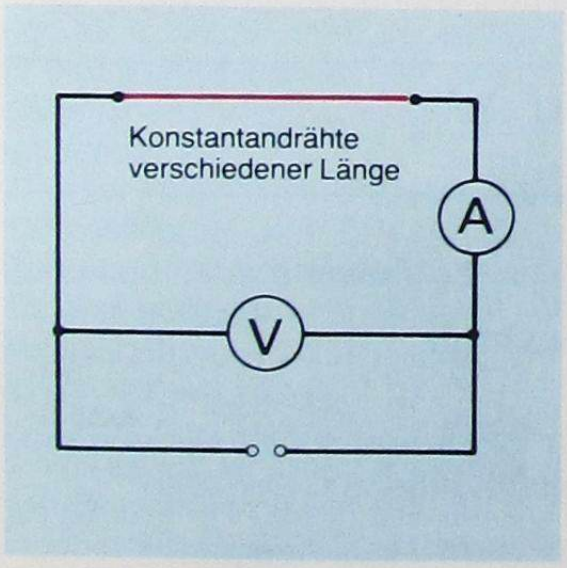


Abb. 23.1. Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes R von der Drahtlänge l

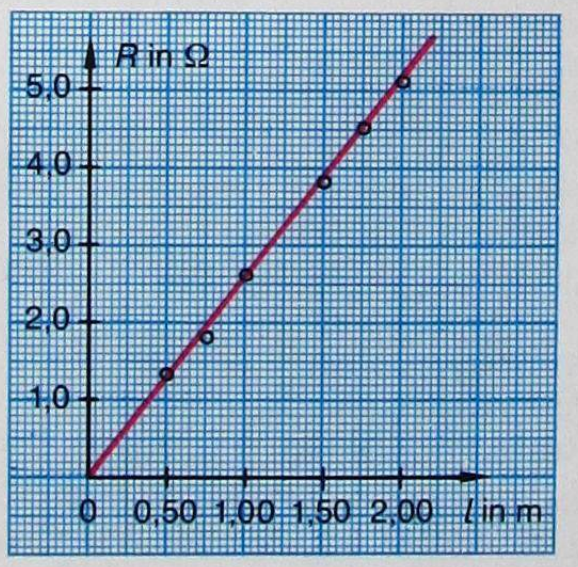


Abb. 23.2. Abhängigkeit des Widerstandes R von der Drahtlänge l

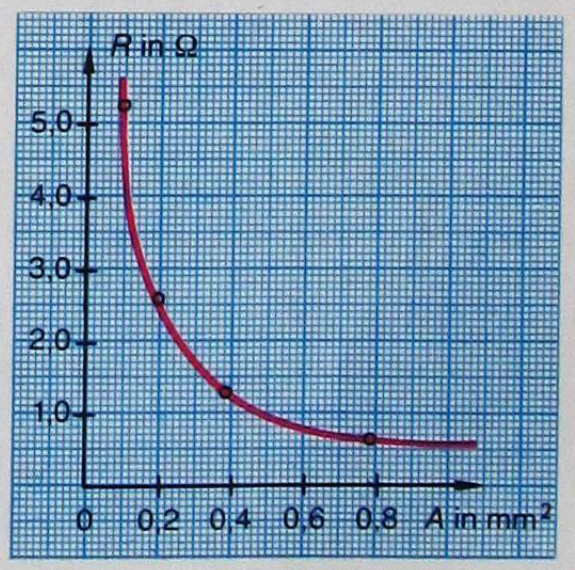


Abb. 23.3. Abhängigkeit des Widerstandes R von der Querschnittsfläche A des Leiters

l in m	0,50	0,75	1,00	1,50	1,75	2,00
U in V	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
I in A	1,60	1,10	0,78	0,52	0,44	0,39
$R = \frac{U}{I}$ in Ω	1,3	1,8	2,6	3,8	4,5	5,1
$\frac{R}{l}$ in $\frac{\Omega}{\text{m}}$	2,6	2,4	2,6	2,5	2,6	2,6

Tab. 24.1. Messbeispiel zur Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes R von der Drahtlänge l

d in mm	0,35	0,50	0,70	1,0
A in mm²	0,10	0,20	0,38	0,79
U in V	2,0	2,0	2,0	2,0
I in A	0,39	0,77	1,5	3,1
$R = \frac{U}{I}$ in Ω	5,3	2,6	1,3	0,65
$A \cdot R$ in mm² · Ω	0,51	0,52	0,49	0,51

Tab. 24.2. Messbeispiel zur Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes R von der Querschnittsfläche A des Leiters

Material	Konstantan	Messing	Eisen	Kupfer
U in V	0,50	0,50	0,50	0,50
I in A	0,19	1,2	0,97	5,6
$R = \frac{U}{I}$ in Ω	2,6	0,42	0,52	0,089

Tab. 24.3. Messbeispiel zur Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes R vom Material des Leiters

Ergebnis. Wir erkennen unmittelbar, dass Drähte mit gleichen Abmessungen, aber aus verschiedenem Material unterschiedliche Widerstände besitzen. Der Widerstand des Konstantandrahtes ist z. B. etwa 30-mal, der des Eisendrahtes etwa 6-mal so groß wie der des Kupferdrahtes. Kupfer leitet also den elektrischen Strom wesentlich besser als Eisen und Konstantan.

Der elektrische Widerstand ist materialabhängig.

Wir fassen die Ergebnisse der Versuche 1. bis 3. zusammen. Aus $R \sim l$ und $R \sim \frac{1}{A}$ folgt $R \sim \frac{l}{A}$.

Durch Einführung eines Proportionalitätsfaktors ρ (ρ: griechischer Buchstabe, sprich rho) erhält man die Größengleichung:

$$R = \rho \frac{l}{A}.$$

Man nennt diese Beziehung auch kurz **Widerstandsformel**. Für die in den Versuchen verwendeten Drähte kann man den Proportionalitätsfaktor ρ jeweils aus zusammengehörigen Messwerten für R, A und l bestimmen.

Aus $R = \rho \frac{l}{A}$ erhält man $\rho = \frac{R \cdot A}{l}$,

für den Konstantandraht: $\rho = \frac{5{,}1\ \Omega \cdot 0{,}20\ \text{mm}^2}{2{,}00\ \text{m}}$,
(letzte Spalte von *Tab. 24.1.*)

$$\rho = 0{,}51\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}},$$

für den Eisendraht: $\rho = 0{,}10\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ und

für den Kupferdraht: $\rho = 0{,}018\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

Versuche mit Drähten aus beliebigem Material und beliebigen Abmessungen bestätigen, dass der Proportionalitätsfaktor ρ für jedes Material (bei einer bestimmten Temperatur) einen konstanten, für das Material charakteristischen Wert besitzt: Der **Proportionalitätsfaktor** ρ ist eine *Materialkonstante*. Er wird **spezifischer Widerstand des Leiters** genannt.

Die **Einheit des spezifischen Widerstandes** ρ ergibt sich aus seiner Definitionsgleichung zu

$$1\ \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = 1\ \Omega \cdot \text{m}$$

Wegen der oft besseren Verwendbarkeit ist auch $1\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ gebräuchlich.

In *Tab. 25.1.* sind die spezifischen Widerstände einiger Materialien angegeben. Der Wert $0{,}027\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ für Aluminium bedeutet:

Ein Aluminiumdraht mit $l = 1{,}0$ m und $A = 1{,}0$ mm² besitzt den Widerstand $\rho = 0{,}027\ \Omega$.

Silber	0,016
Kupfer	0,017
Aluminium	0,027
Wolfram	0,05
Messing	0,08
Eisen	0,10
Platin	0,11
Manganin	0,43
Konstantan	0,50
Quecksilber	0,96
Kohle	40 bis 80
Germanium	900
Silicium	1200
Schwefelsäure im Akku	15 000
Glas	10^{16} bis 10^{22}

Tab. 25.1. Spezifische Widerstände in $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ (Material bei 18 °C)

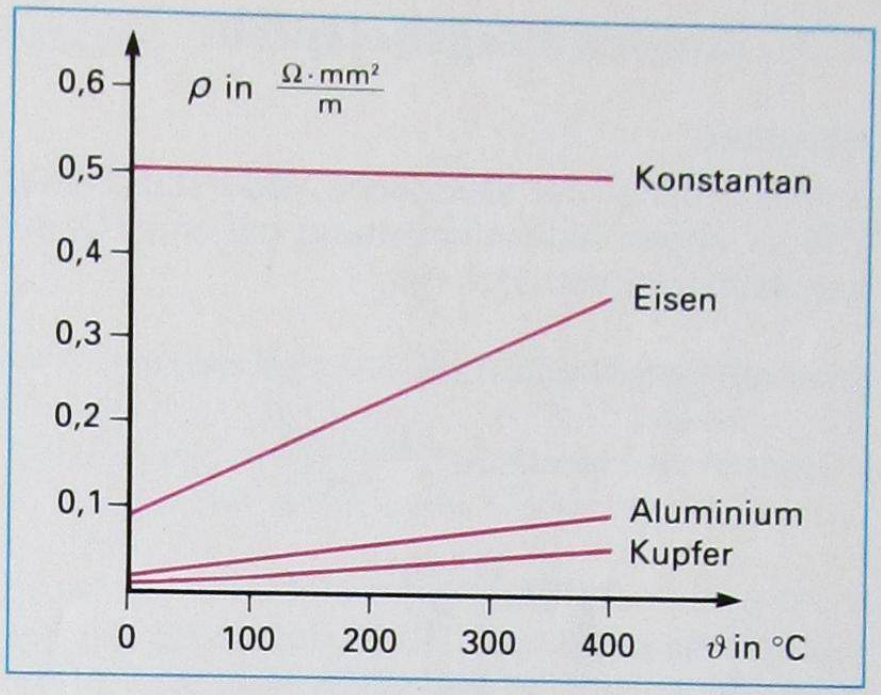


Abb. 25.1. Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes ρ von der Temperatur ϑ

Normalerweise hängt der elektrische Widerstand eines Leiters von seiner Temperatur ab; deshalb ist auch sein spezifischer Widerstand temperaturabhängig. Bei den meisten metallischen Leitern wird der spezifische Widerstand mit zunehmender Temperatur größer, mit abnehmender Temperatur kleiner; bei Kohle und Elektrolyten ist es umgekehrt.

Die Angabe eines spezifischen Widerstandes gilt deshalb nur für eine bestimmte Temperatur des Leitermaterials *(Tab. 25.1.)*. In *Abb. 25.1.* ist die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes einiger Metalle von der Temperatur graphisch dargestellt.

Zusammenfassung

1. Für den elektrischen Widerstand gilt:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

2. Der spezifische Widerstand ρ ist im Allgemeinen von der Temperatur des Leiters abhängig.

Aufgaben

1. Brennt eine Glühlampe durch, so geschieht dies meistens beim Einschalten (nach kurzem Aufleuchten) und nicht beim Betrieb der Lampe. Erklärung?
2. Deute die Zunahme des elektrischen Widerstandes eines stromdurchflossenen Kupferdrahtes bei Temperaturerhöhung.
3. Unter welcher Bedingung gilt das ohmsche Gesetz für metallische Leiter?
4. Beschreibe das Experiment zur Untersuchung der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Metalldrahtes
a) von dessen Länge,
b) von dessen Querschnittsfläche.
5. Wie hängt der elektrische Widerstand eines Drahtes von dessen Abmessungen ab? Leite mit Hilfe dieser Ergebnisse die Widerstandsformel her. Welche Bedeutung hat die Konstante in der Formel?
6. a) Warum sind die Drähte elektrischer Leitungen normalerweise aus Kupfer?
b) Welche Metalle würden sich noch für die Drähte elektrischer Leitungen eignen?
7. Wie ändert sich der elektrische Widerstand eines Konstantandrahtes, wenn
a) bei gleicher Länge seine Querschnittsfläche vervierfacht wird,
b) bei gleicher Querschnittsfläche seine Länge verdoppelt wird,
c) seine Länge und Querschnittsfläche verdreifacht werden,
d) seine Länge halbiert und seine Querschnittsfläche fünfmal so groß wird,
e) seine Länge auf ein Drittel und seine Querschnittsfläche auf ein Viertel reduziert werden?
8. Durch eine 500 m lange Freileitung aus Kupfer $\left(\text{spezifischer Widerstand } \rho = 0{,}017 \frac{\Omega\,mm^2}{m}\right)$ mit 10 mm^2 Querschnittsfläche fließt ein Strom von 40 A. Wie groß ist die in einer Sekunde an die umgebende Luft abgegebene Wärme?

2.5. Anwendungsbeispiele

Beispiele

1. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer 750 m langen Aluminiumleitung mit einer Querschnittsfläche von 15,9 mm^2?

Lösung: geg.: $l = 750\ m$, $A = 15{,}9\ mm^2$,

$$\rho = 0{,}027\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

$$R = \rho \frac{l}{A};\ R = \frac{0{,}027\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot 750\ m}{15{,}9\ mm^2};\ R = 1{,}3\ \Omega$$

2. Eine Spule ist aus Kupferdraht (Durchmesser $d = 0{,}40\ mm$) gewickelt. Wie lang muss der Draht sein, damit er einen Widerstand von 30 Ω besitzt?

Lösung: geg.: $R = 30\ \Omega$; $d = 0{,}40\ mm$;

$$\rho = 0{,}017\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m};\ A = r^2 \pi;$$

$$l = \frac{R \cdot A}{\rho};\ l = \frac{30\ \Omega \cdot (0{,}20\ mm)^2 \cdot 3{,}14}{0{,}017\ \frac{\Omega\, mm^2}{m}};$$

$$l = 2{,}2 \cdot 10^2\ m$$

3. Welche Querschnittsfläche muss eine 35 m lange Kupferleitung haben, wenn ihr Widerstand 0,40 Ω betragen soll? Welchen Durchmesser hat der Draht?

Lösung: geg.: $l = 35\ m$, $R = 0{,}40\ \Omega$,

$$\rho = 0{,}017\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m};$$

$$A = \frac{\rho \cdot l}{A};\ A = \frac{0{,}017\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot 35\ m}{0{,}40\ \Omega};\ A = 1{,}5\ mm^2$$

$$A = r^2 \pi;\ \Rightarrow r^2 = \frac{A}{\pi};\ r = \sqrt{\frac{A}{\pi}};\ d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}};$$

$$d = 2\sqrt{\frac{1{,}5\ mm^2}{3{,}14}};\ d = 1{,}4\ mm.$$

Zusammenfassung

Das Wort Widerstand bezeichnet sowohl die physikalische Größe $R = \frac{U}{I}$ als auch die dazugehörigen elektrischen Geräte.

Aufgaben

1. Welchen Widerstand besitzt ein 30,0 m langer Konstantandraht mit einer Querschnittsfläche von 0,10 mm^2?

2. Ein Kupferdraht von 12,0 km Länge besitzt einen Widerstand von 12,8 Ω.
a) Welche Querschnittsfläche,
b) welchen Durchmesser hat der Draht?

3. Wie lang muss ein Konstantandraht mit einem Durchmesser von 0,60 mm sein, damit er einen Widerstand von 300 Ω besitzt?

4. Eine Kupferleitung mit einer Querschnittsfläche von 1,0 mm^2 soll durch eine Aluminiumleitung ersetzt werden. Welche Querschnittsfläche muss der Aluminiumdraht haben, wenn der elektrische Widerstand der Leitung unverändert bleiben soll?

5. Ein 250 m langer Draht ($d = 0{,}60\ mm$) besitzt einen Widerstand von 380 Ω. Aus welchem Material könnte der Draht sein?

3. Reihen- und Parallelschaltung

3.1. Unverzweigter Stromkreis – Reihenschaltung von Widerständen

Wir schalten in einen einfachen Stromkreis mit einer Glühlampe einen Schiebewiderstand *(Abb. 27.1.)*. Die Helligkeit der Glühlampe nimmt umso stärker ab, je größer der eingeschaltete Widerstand ist. Voraussetzung ist dabei aber, dass die Spannung unverändert bleibt. Offensichtlich sinkt die Stromstärke, wenn zum Widerstand, den die Glühlampe besitzt, ein weiterer Widerstand in den Stromkreis eingebaut wird. Eine derartige Schaltung nennt man **Hintereinanderschaltung** oder **Reihenschaltung** von Widerständen.

Auch wenn die Widerstände verschieden groß sind, fließt in jedem der beiden Widerstände der gleiche Strom, da in einem unverzweigten Stromkreis die elektrische Stromstärke an jeder Stelle gleich ist. Würde z. B. der Strom in der Glühlampe größer sein als im Widerstand *(Abb. 27.1.)*, dann müssten im Leiter dazwischen ständig Elektronen verschwinden bzw. sich ansammeln. Es gilt also: $I = I_1 = I_2$. Offensichtlich sind aber die Spannungen, die an der Glühlampe und am Widerstand abfallen, normalerweise verschieden.

Dies wollen wir mit einem Versuch genauer untersuchen.

Versuch

Drei Widerstände ($R_1 = 10\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $R_3 = 50\ \Omega$) werden hintereinander in einen Stromkreis geschaltet *(Abb. 27.2.)*; die angelegte Spannung wird mehrmals geändert. Folgende Größen werden jeweils gemessen: die Stromstärke I, die Gesamtspannung U_g und die an den einzelnen Widerständen anliegenden Spannungen U_1, U_2, U_3 *(Tab. 28.1.)*.

Ergebnis. Die Messergebnisse lassen erkennen: Bei der Reihenschaltung von Widerständen teilt sich die zwischen den Polen der Spannungsquelle liegende Gesamtspannung auf die einzelnen Widerstände auf: $U = U_1 + U_2 + U_3$. Dabei ist die Teilspannung umso größer, je größer der Einzelwiderstand ist. Der Quotient zweier Teilspannungen ist dabei gleich dem Quotient der zugehörigen Einzelwiderstände: $U_1 : U_2 = R_1 : R_2$.

Die Beziehung $U = U_1 + U_2 + U_3$ ist eine vereinfachte Schreibweise des **zweiten kirchhoffschen Gesetzes**[1] oder der **Maschenregel**.

Für die an den Einzelwiderständen liegenden Teilspannungen gilt: $U_1 = R_1 \cdot I$, $U_2 = R_2 \cdot I$, $U_3 = R_3 \cdot I$. Man sagt auch, am Widerstand R_1 fällt die Teilspannung U_1, am Widerstand R_2 die Teilspannung U_2, am Widerstand R_3 die Teilspannung U_3 ab und bezeichnet allgemein das Produkt $R \cdot I$ als **Spannungsabfall**.

[1] GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF, Physiker *(s. S. 32)*, stellte im Jahre 1845 die Gesetze für die Verzweigung elektrischer Ströme auf.

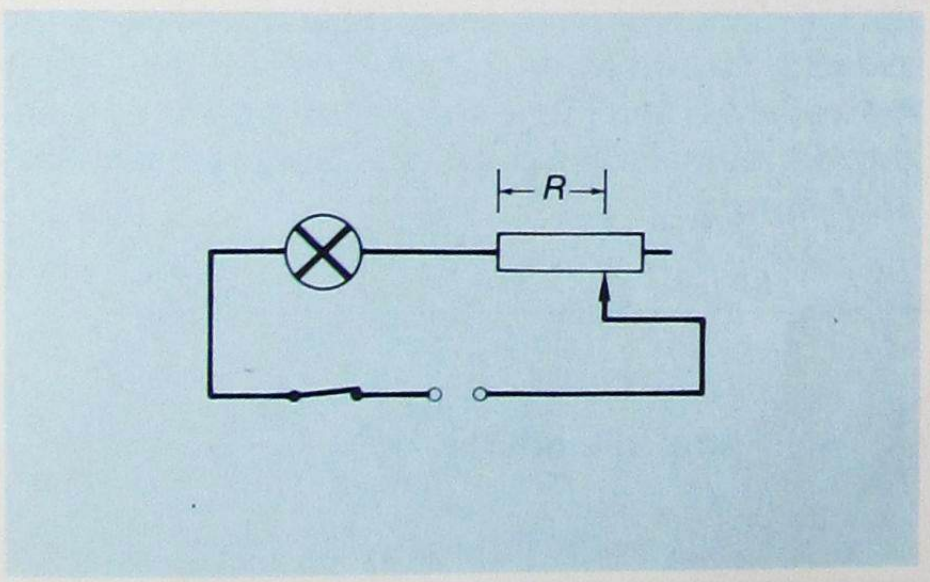


Abb. 27.1. Reihenschaltung einer Glühlampe und eines Widerstandes in einem unverzweigten Stromkreis

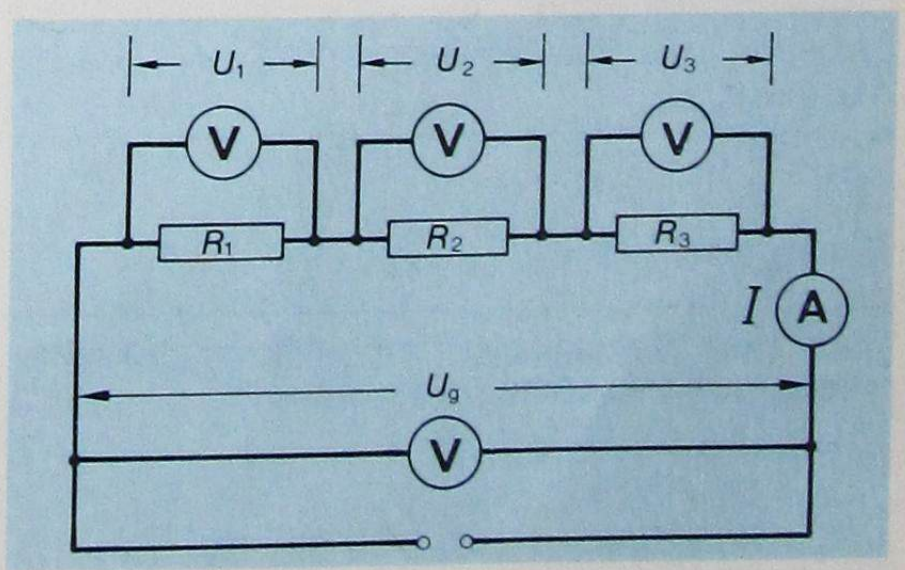


Abb. 27.2. Messversuch zur Ermittlung der Gesetze bei hintereinander geschalteten Widerständen

R_1 in Ω	R_2 in Ω	R_3 in Ω	U_g in V	U_1 in V	U_2 in V	U_3 in V	I in A	$R_g = \frac{U_g}{I}$ in Ω
10	20	50	4,0	0,5	1,0	2,5	0,05	80
10	20	50	8,0	1,0	1,9	5,0	0,10	80
10	20	50	12,0	1,4	3,0	7,5	0,14	86
10	20	50	16,0	2,0	4,0	10,0	0,21	76
10	20	50	20,0	2,5	5,1	12,5	0,24	83

Tab. 28.1. Messbeispiel

Wir wollen uns die drei Einzelwiderstände durch einen Widerstand so ersetzt denken, dass bei der gleichen Gesamtspannung der gleiche Strom fließt. Er heißt **Ersatzwiderstand** oder **Gesamtwiderstand** und wird durch den Quotienten aus der Gesamtspannung und der Stromstärke ermittelt: $R_g = \frac{U_g}{I}$ (*Tab. 28.1.*, letzte Spalte). Es zeigt sich, dass dieser so groß ist wie die Summe der Einzelwiderstände.

Man kann dies auch durch eine Umformung erhalten:

$$R_g = \frac{U_g}{I} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} =$$

$$= R_1 + R_2 + R_3.$$

Der Gesamtwiderstand ist also größer als der größte der Einzelwiderstände.

Wenn man $R_g = \frac{U_g}{I}$, $R_1 = \frac{U_1}{I}$ usw. nach I auflöst, gleichsetzt und umformt, dann erhält man:

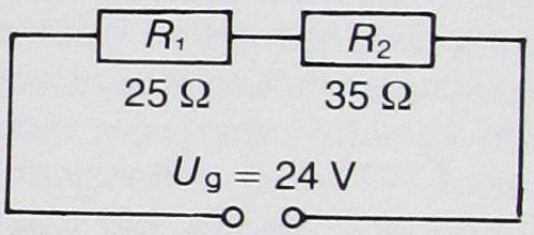
Die Einzelspannungen verhalten sich zu der Gesamtspannung wie die Einzelwiderstände zum Gesamtwiderstand, $U_1 : U_g = R_1 : R_g$ usw.

Beispiel

An zwei in Reihe geschalteten Widerständen (R_1 = 25 Ω, R_2 = 35 Ω) liegt die Spannung U = 24 V. Berechne:

a) den Gesamtwiderstand der Schaltung,
b) die Ströme in den Widerständen,
c) die Spannungsabfälle an den Einzelwiderständen.

Lösung: geg.:



ges.: a) R_g, b) I, c) U_1, U_2;

a) $R_g = R_1 + R_2 = 25\ \Omega + 35\ \Omega$, $R_g = 60\ \Omega$

b) $I = \frac{U_g}{R_g} = \frac{24\ \text{V}}{60\ \Omega} = 0{,}40\ \text{A}$

c) $U_1 = R_1 \cdot I = 25\ \Omega \cdot 0{,}40\ \text{A} = 10\ \text{V}$
$U_2 = R_2 \cdot I = 35\ \Omega \cdot 0{,}40\ \text{A} = 14\ \text{V}$

Mit einer geeigneten Wahl von R_1 und R_2 kann man erreichen, dass jede beliebige Spannung zwischen 0 und U_g an R_1 bzw. an R_2 abfällt. Wenn man eine Hintereinanderschaltung dazu verwendet, nennt man dies auch eine **Spannungsteilerschaltung.**

Zusammenfassung

Für die Reihenschaltung (Hintereinanderschaltung) von Widerständen gilt:

$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$
$U_g = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$
$R_g = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ **oder allgemein** $\frac{U_m}{U_n} = \frac{R_m}{R_n}$.

3.2. Verzweigter Stromkreis – Parallelschaltung von Widerständen

In *Abb. 29.1.* sind drei Glühlampen so an eine Spannungsquelle angeschlossen, dass jede unabhängig von den anderen ein- und ausgeschaltet werden kann. Jede Lampe liegt deshalb in einem eigenen Leiterzweig. Eine derartige Schaltung von elektrischen Widerständen bzw. elektrischen Geräten bezeichnet man als **Parallelschaltung**.

Versuch

Wir messen die elektrische Spannung zwischen den Polen der Spannungsquelle und zwischen den Verzweigungspunkten A und B der Zweigleitungen *(Abb. 29.1.)*.
Beobachtung. Die Spannung zwischen den Polen der Spannungsquelle und zwischen den Verzweigungspunkten ist gleich. An parallel geschalteten Glühlampen liegt also die gleiche Spannung an: $U = U_1 = U_2$.

Wir untersuchen nun die Ströme in den parallel geschalteten Widerständen.

Versuch

Zwei Widerstände ($R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 50\ \Omega$) werden parallel an eine Spannungsquelle angeschlossen *(Abb. 29.2.)*; die Spannung wird mehrmals geändert. Folgende Größen werden jeweils gemessen: die Stromstärke I_g in der unverzweigten Leitung, die Ströme I_1, I_2 in den Zweigleitungen und die Spannung U *(Tab. 30.1.)*.
Ergebnis. Bei der Parallelschaltung von zwei Widerständen teilt sich der Gesamtstrom I_g im Punkt A in die Teilströme I_1 und I_2 auf. Diese fließen durch die Leiterzweige und vereinigen sich im Punkt B wieder zum Gesamtstrom $I_g = I_1 + I_2$. In dem Zweig mit dem kleineren Widerstand fließt der größere Teilstrom, in dem Zweig mit dem größeren Widerstand der kleinere Teilstrom. Es zeigt sich, dass $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$ ist *(Tab. 30.1.)*. Diese Produkte sind gleich den Spannungen U_1 und U_2, die an den Widerständen R_1 und R_2 abfallen. Bildet man die Quotienten aus den Zweigströmen und den Widerständen, so erhält man den Zusammenhang: $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$. Die Beziehung $I_g = I_1 + I_2$ heißt auch **erstes kirchhoffsches Gesetz** oder **Knotenregel**.

Wie bei der Reihenschaltung kann man auch bei der Parallelschaltung den **Gesamtwiderstand** oder **Ersatzwiderstand** $\boldsymbol{R_g = \frac{U_g}{I}}$ ausrechnen. Für unseren Versuch erhält man für den Gesamtwiderstand: $R_g = \frac{U}{I_g} = \frac{6{,}0\ \text{V}}{0{,}42\ \text{A}} = 14\ \Omega$.

Man kann den Gesamtwiderstand R_g auch aus den Einzelwiderständen ermitteln. Dazu setzt man die Beziehungen $I_g = \frac{U}{R_g}$; $I_1 = \frac{U}{R_1}$; $I_2 = \frac{U}{R_2}$, die aus dem ohmschen Gesetz folgen, in $I_g = I_1 + I_2$ ein:

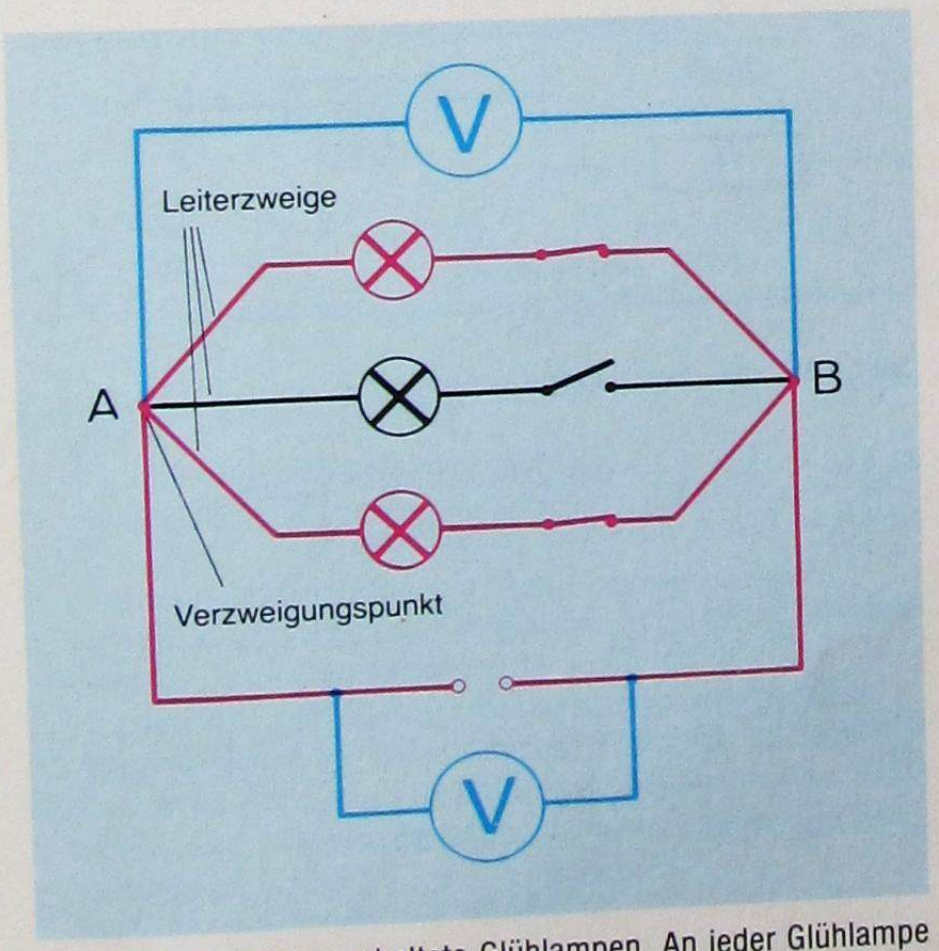


Abb. 29.1. Parallel geschaltete Glühlampen. An jeder Glühlampe liegt die gleiche Spannung an.

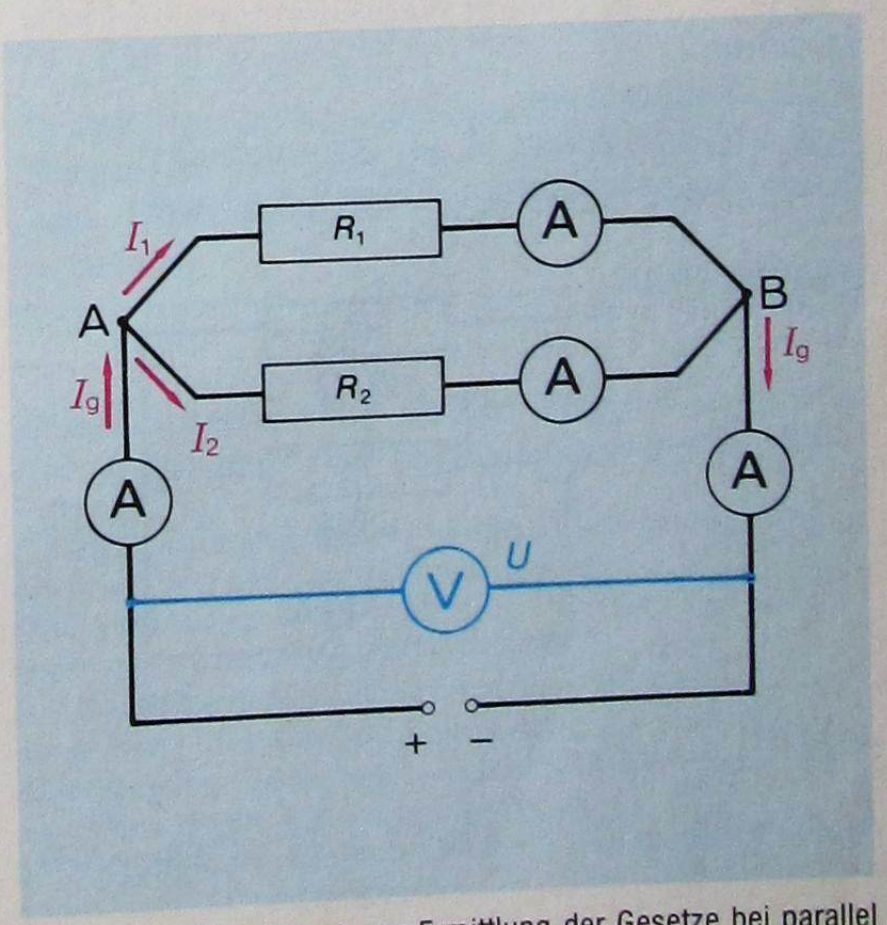


Abb. 29.2. Messversuch zur Ermittlung der Gesetze bei parallel geschalteten Widerständen

U in V	R_1 in Ω	R_2 in Ω	I_1 in A	I_2 in A	I_g in A	$R_1 \cdot I_1$ in Ω · A	$R_2 \cdot I_2$ in Ω · A
3,0	20	50	0,15	0,06	0,20	3,0	3,0
6,0	20	50	0,29	0,12	0,42	5,8	6,0
9,0	20	50	0,45	0,17	0,61	9,0	8,5
12,0	20	50	0,60	0,25	0,85	12,0	12,5

Tab. 30.1. Messbeispiel

$\frac{U}{R_g} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$; nach Division durch U erhält man:

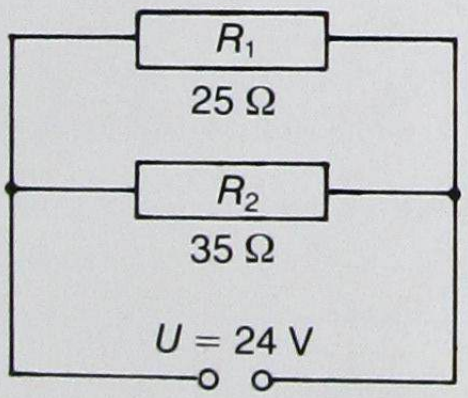
$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Ist in unserem Versuch nur der kleinere Widerstand ($R_1 = 20\ \Omega$) angeschlossen, so fließt bei einer vorgegebenen Spannung im Stromkreis der kleinere Gesamtstrom I_1. Schaltet man zum kleineren Widerstand den größeren Widerstand ($R_2 = 50\ \Omega$) parallel, so wird der Gesamtstrom um die Stromstärke in R_2 größer: $I_g = I_1 + I_2$; der Gesamtwiderstand ist dann kleiner als vorher; also kleiner als der kleinere Widerstand.

Beispiele

1. An zwei parallel geschalteten Widerständen ($R_1 = 25\ \Omega$, $R_2 = 35\ \Omega$) liegt eine Spannung von 24 V. Berechne:
a) die Zweigströme,
b) den Gesamtstrom in der Hauptleitung,
c) den Gesamtwiderstand der Schaltung.

Lösung: geg.:



ges.: R_g, I_1, I_2, I_g;

a) $R_g = (R_1^{-1} + R_2^{-1})^{-1} = (25^{-1} + 35^{-1})^{-1}\ \Omega = 15\ \Omega$

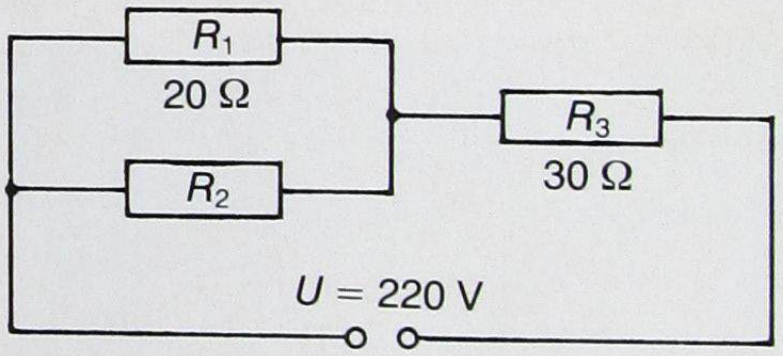
b) $I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{24\text{ V}}{25\ \Omega} = 0{,}96\text{ A}$;

$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{24\text{ V}}{35\ \Omega} = 0{,}69\text{ A}$

c) $I_g = I_1 + I_2 = 0{,}96\text{ A} + 0{,}69\text{ A} = 1{,}65\text{ A}$

2. Zwei Widerstände R_1 und R_2 sind parallel und mit einem weiteren Widerstand R_3 in Reihe geschaltet. Der Gesamtstrom beträgt $I_g = 5{,}1$ A, wenn an der Schaltung die Spannung 230 V anliegt. Berechne:
a) den Spannungsabfall an $R_3 = 30\ \Omega$,
b) den Spannungsabfall an R_1 und R_2,
c) die Stromstärke I_1 durch $R_1 = 20\ \Omega$,
d) den Widerstand R_2.

Lösung: geg.:



ges.: U_3, U_1 und U_2, I_1, R_2;

a) $U_3 = R_3 \cdot I_g = 30\ \Omega \cdot 5{,}1\text{ A} = 153\text{ V}$,

b) $U_1 = U_2 = 230\text{ V} - 153\text{ V} = 77\text{ V}$

c) $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{77\text{ V}}{20\ \Omega} = 3{,}9\text{ A}$

d) $R_2 = \frac{U_2}{I_2}$ mit $I_2 = I_g - I_1 = 5{,}1\text{ A} - 3{,}9\text{ A}$

$= 1{,}2\text{ A}$; $R_2 = \frac{77\text{ V}}{1{,}2\text{ A}} = 64\ \Omega$.

Schaltung elektrischer Geräte im Haushalt

Alle elektrischen Geräte im Haushalt (Lampen, Heizgeräte, Elektromotoren) sind parallel geschaltet. Jedes Gerät liegt in einem eigenen Leiterzweig, der am Phasenleiter und am Nullleiter des Stromnetzes im Haus angeschlossen ist *(Abb. 31.1.)*. Dadurch können alle elektrischen Geräte mit der gleichen Spannung (im Haushalt 230 V) betrieben werden, und jedes Gerät kann ein- und ausgeschaltet werden, ohne dabei den Betrieb anderer elektrischer Geräte zu stören.

Da jedes Gerät in der Regel einen anderen Widerstand besitzt, sind die Ströme in den Zweigleitungen verschieden groß. Bei gleichzeitigem Betrieb mehrerer elektrischer Geräte fließt durch die Hauptleitungen und durch die zugehörigen Sicherungen der sich aus den Zweigströmen summierende Gesamtstrom. Die Sicherung unterbricht den Phasenleiter, sobald der Gesamtstrom größer ist als die aus Sicherheitsgründen (Erwärmung der Drähte) mögliche Höchststromstärke (z. B. 10 A, 16 A, 20 A).

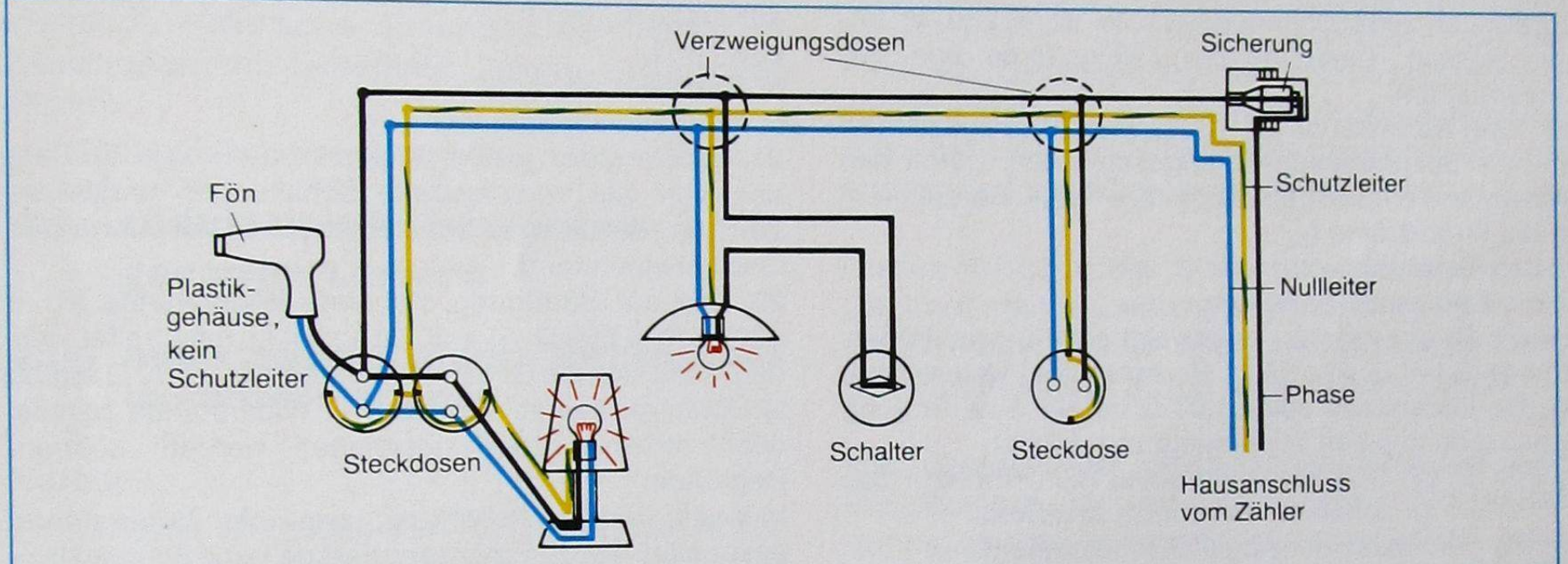


Abb. 31.1. Stromverzweigungen in einen Wohnraum (Schema)

Zusammenfassung

1. Für die Reihenschaltung (Hintereinanderschaltung) von Widerständen gilt:

$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$

$I_g = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$

$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$

$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ **oder allgemein** $\frac{I_m}{I_n} = \frac{R_n}{R_m}$.

2. Mit einem Parallelwiderstand kann man Stromstärken anpassen, durch Verzweigen von Stromkreisen kann man Teilströme erhalten.

Aufgaben

1. Wie lautet die Maschenregel?
2. Was bezeichnet man als Spannungsabfall an einem Widerstand?
3. Was bezeichnet man als Gesamtwiderstand?
4. Wie erhält man den Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung durch Umformung?
5. Für eine Christbaumbeleuchtung stehen elektrische Kerzen mit je 14,0 V Betriebsspannung zur Verfügung. Wie sind die Kerzen zu schalten, damit sie an das 230-V-Netz angeschlossen werden können? Wie viele Kerzen werden benötigt?
6. Zwei Widerstände ($R_1 = 400\ \Omega$, $R_2 = 700\ \Omega$) sind hintereinander an eine Spannungsquelle mit einer Spannung von 230 V geschaltet. Berechne den Gesamtwiderstand, die Ströme in den Widerständen und die an den Einzelwiderständen anliegenden Spannungen.
7. Ein elektrisches Gerät mit den Anschlussdaten 50 V/4,5 A soll mit Hilfe eines Vorwiderstandes an das Netz (230 V) angeschlossen werden. Zeichne eine Schaltskizze und berechne den Vorwiderstand.
8. Zwei Widerstände ($R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 60\ \Omega$) sind in Reihe geschaltet. Sie werden von einem Strom $I = 2{,}75$ A durchflossen. Berechne die Gesamtspannung und die an jedem Widerstand anliegende Spannung.
9. Der Spannungsabfall an einem 200 m langen Kupferkabel soll 20 V nicht übersteigen. Welchen Widerstand besitzt das Kabel, wenn ein Strom von 500 A durchfließt? Welche Querschnittsfläche hat das Kabel?

10. Bestimme den Spannungsabfall an einer 50 m langen Aluminiumleitung mit einer Querschnittsfläche von 3,5 mm^2, wenn sie von einem Strom $I = 7{,}5$ A durchflossen wird.

11. Drei Widerstände ($R_1 = 25\ \Omega$, $R_2 = 15\ \Omega$, $R_3 = 10\ \Omega$) sind in Reihe geschaltet. Die an der Schaltung anliegende Spannung beträgt 24 V. Wie groß sind der Gesamtwiderstand, die Stromstärke und die Spannungsabfälle an den Einzelwiderständen?

12. Wie lautet die Knotenregel?

13. Stelle die Gesetzmäßigkeiten für Spannung, Strom und Widerstand bei Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen einander gegenüber.

14. Zwei Widerstände ($R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 300\ \Omega$) sind parallel an eine Spannungsquelle ($U = 230$ V) angeschlossen. Berechne die Zweigströme und den Gesamtstrom.

15. Zwei Widerstände ($R_1 = 30\ \Omega$, $R_2 = 70\ \Omega$) sind parallel an eine Spannungsquelle angeschlossen. Durch den Widerstand R_1 fließt ein Strom $I_1 = 1{,}2$ A. Berechne:
a) die Stromstärke I_2,
b) den Gesamtstrom,
c) die anliegende Spannung.

16. Ein Strom von 13 A verzweigt sich in zwei Widerstände ($R_1 = 1\ \Omega$, $R_2 = 25\ \Omega$). Berechne die Zweigströme.

17. Ein Widerstand sollte 1,00 Ω haben. Eine Prüfung ergab jedoch einen Widerstand von 1,02 Ω.
a) Wie ist ein „Abgleichwiderstand" zur Korrektur des Fehlers zu schalten? Begründe, skizziere.
b) Wie groß muss der Abgleichwiderstand sein?
Nimm gegebenenfalls eine Spannung von 10 V an.

18. Drei Widerstände ($R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 100\ \Omega$, $R_3 = 200\ \Omega$) sind parallel an 100 V geschaltet. Berechne die Teilströme und den Gesamtwiderstand.

19. Drei Widerstände ($R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 200\ \Omega$, $R_3 = 600\ \Omega$) und eine Spannungsquelle mit 200 V stehen zur Verfügung. Die Widerstände sind in folgender Weise zu schalten:
a) alle hintereinander,
b) alle parallel,
c) R_1 und R_2 hintereinander und mit R_3 parallel,
d) R_1 und R_2 parallel mit R_3 hintereinander,
e) R_2 und R_3 hintereinander und mit R_1 parallel.
Berechne in jedem Fall die Gesamtstromstärke, je nach Schaltung die Stärke der Teilströme oder die Spannungsabfälle an den Widerständen. Gib auch den Gesamtwiderstand an. Fertige zu jeder Schaltung eine Skizze an.

20. Zwei Widerstände R_1 und R_2 sind parallel geschaltet. Was ist über die Größe des Gesamtwiderstandes auszusagen, wenn
a) $R_2 = R_1$,
b) R_2 größer als R_1 ist,
c) R_2 unendlich groß ist?

21. Mit drei gleich großen Widerständen von je 20 Ω lassen sich vier verschiedene Schaltungen herstellen. Zeichne jeweils eine Schaltskizze und berechne den Gesamtwiderstand.

22. Drei zur Verfügung stehende Widerstände ($R_1 = 400\ \Omega$, $R_2 = 600\ \Omega$, $R_3 = 60\ \Omega$) sollen so geschaltet werden, dass sich ein Gesamtwiderstand $R_g = 300\ \Omega$ ergibt.
a) Überlege zuerst, ob alle drei Widerstände parallel oder hintereinander geschaltet werden können. Begründe.
b) Zeige durch Rechnung, wie die Widerstände geschaltet werden müssen. Fertige eine Schaltskizze an.
c) Welche Spannung fällt an den einzelnen Widerständen ab, wenn die Schaltung an 230 V angeschlossen ist?
d) Berechne die Ströme, die durch die einzelnen Widerstände fließen.

Aus der Geschichte der Physik: Kirchhoff und die Gesetze der Stromverzweigung

Der Deutsche GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824 bis 1887) war ein sehr vielseitiger Physiker. Im Jahr 1859 fand er zusammen mit dem Chemiker und Physiker ROBERT WILHELM BUNSEN (1811 bis 1899) heraus, dass jedes chemische Element in gasförmigem Zustand nur Licht bestimmter Wellenlänge abstrahlt und entdeckte so die Spektrallinien. Mit deren Hilfe fand er in den Jahren 1860 und 1861 die beiden neuen Elemente Caesium und Rubidium.

Seine Forschungen gingen von der Wärmeleitung über die Untersuchung zur Absorption und Emission von Licht glühender Körper bis hin zur spektralen Untersuchung der Sonne und von Fixsternen. Seine von ihm gefundenen kirchhoffschen Regeln erlauben es, Berechnungen in verzweigten Stromkreisen anzustellen. Damit ist es z. B. möglich, die Ströme und Leistungen zu berechnen, wenn mehrere Verbraucher an eine Stromquelle angeschlossen werden.

4. Die elektromagnetische Induktion

Die meisten unserer Geräte des täglichen Bedarfs werden mit elektrischem Strom betrieben. Ein Wasser- oder Wärmekraftwerk stellt aber zunächst *mechanische Energie* zur Verfügung. Die mechanische Energie muss somit in *elektrische Energie* umgewandelt werden. Der *Fahrraddynamo*, die *Lichtmaschine* im Kraftfahrzeug, der *Generator* im Elektrizitätswerk sind solche Maschinen, in denen mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Die hierbei durch Trennung elektrischer Ladungen entstehende elektrische Spannung verursacht bei geschlossenem Leiterkreis einen elektrischen Strom.

4.1. Induktion in bewegten geraden Leitern

4.1.1. Induktionsspannung – Richtung des Induktionsstromes

Versuch

Ein an zwei Metallbändern aufgehängtes Leiterstück, eine sog. *Leiterschaukel*, wird mit einem empfindlichen Strommesser verbunden. Die Leiterschaukel wird zunächst senkrecht, dann parallel zu den Feldlinien eines Hufeisenmagneten bewegt *(Abb. 33.1.)*.

Beobachtung. Während der Bewegung des Leiters senkrecht zu den Feldlinien des Magneten zeigt das Messgerät einen elektrischen Strom im Stromkreis an. Steht der Leiter still, so fließt kein Strom. Wird der Leiter parallel zu den Feldlinien des Magneten bewegt, fließt ebenfalls kein Strom.

Elektrischer Strom kann nur fließen, wenn eine elektrische Spannung vorhanden ist. Daher muss bei der Bewegung des Leiters senkrecht zu den Feldlinien des Magneten eine elektrische Spannung erzeugt werden, und zwar so lange, wie die Bewegung des Leiters andauert.

Wird das gerade Leiterstück allein (also kein geschlossener Stromkreis) senkrecht zu den Feldlinien des Magneten bewegt, so entsteht zwischen seinen Enden eine elektrische Spannung; d. h., ein Leiterende wird elektrisch positiv, das andere Ende elektrisch negativ geladen.

Diesen Vorgang der Spannungsentstehung bezeichnet man als *elektromagnetische Induktion*[1], die erzeugte Spannung als *Induktionsspannung*, den verursachten Strom als *Induktionsstrom.*

Die *Ursache der Spannungsentstehung* beim Induktionsvorgang sind Kräfte, die im Magnetfeld auf die frei beweglichen Elektronen im bewegten Leiterstück wirken. Diese Kräfte heißen *Lorentzkräfte (Abb. 33.2.).* Die freien Elektronen werden hierbei im Leiter verschoben, so dass an einem Leiterende ein *Elektronenüberschuss*, am anderen Ende ein *Elektronenmangel* entsteht. Damit herrscht eine elektrische Spannung zwischen den Enden des Leiters. Sobald der Leiter und mit ihm die freien Elektronen nicht mehr quer zu den Feld-

[1] von *inducere* (lat.) = hineinführen

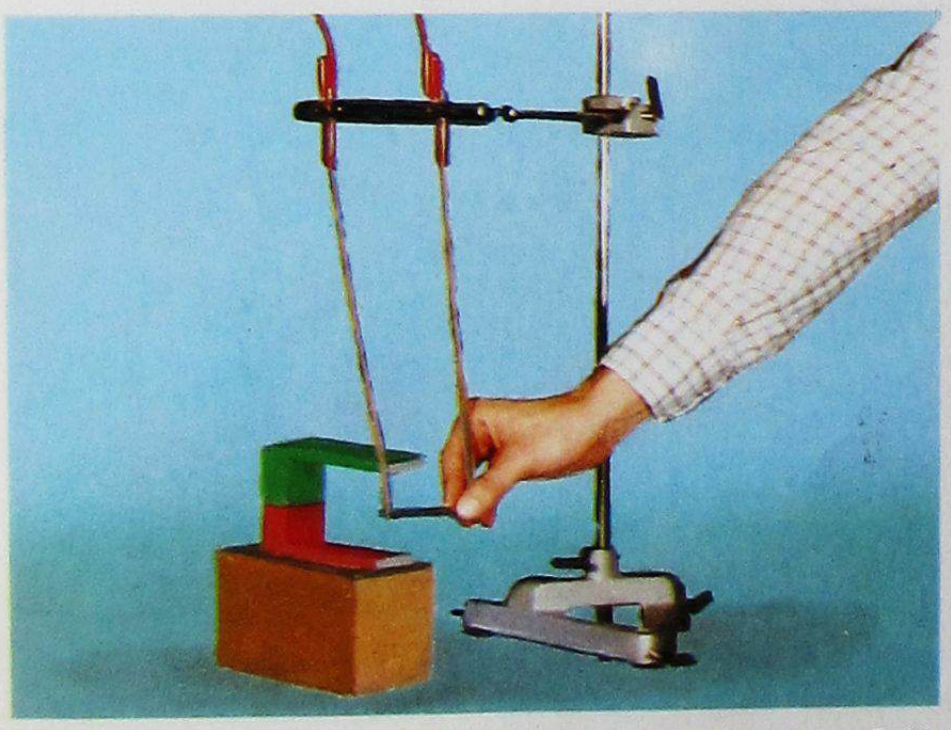


Abb. 33.1. Bewegung der Leiterschaukel senkrecht zu den Feldlinien des Magneten

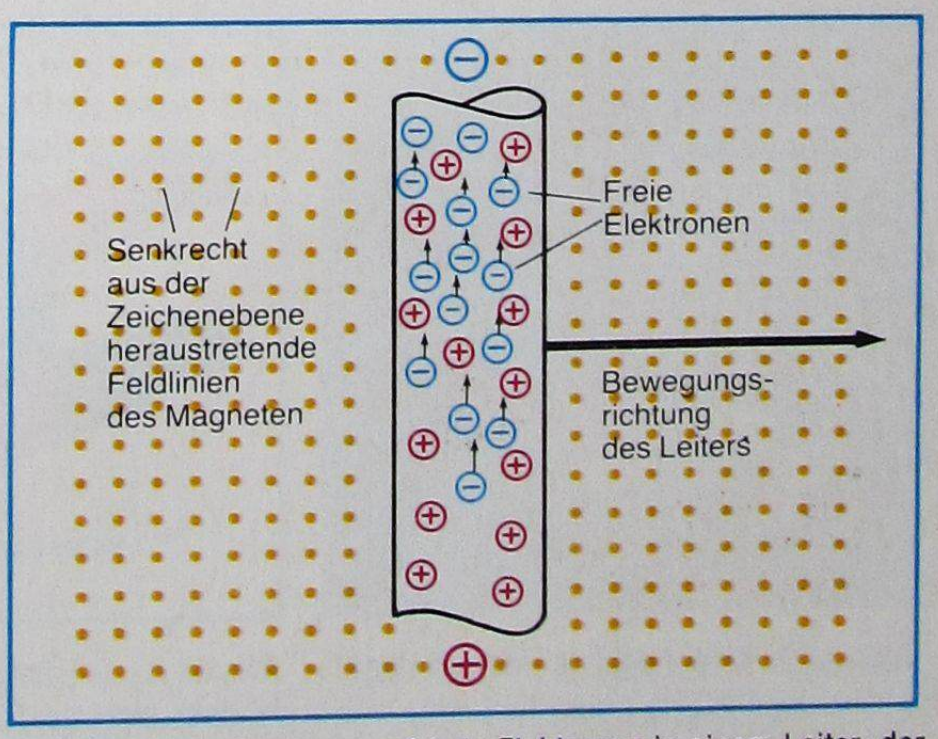


Abb. 33.2. Kraftwirkung auf freie Elektronen in einem Leiter, der senkrecht zu den Feldlinien eines Magneten bewegt wird

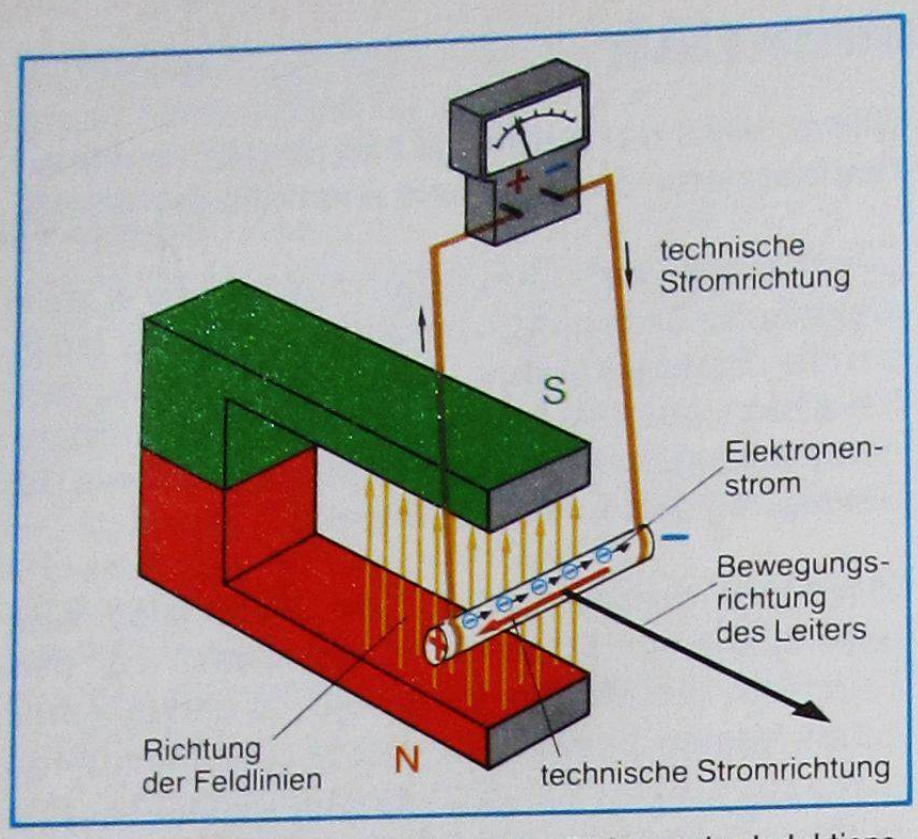


Abb. 34.1. Bestimmung der technischen Richtung des Induktionsstromes

linien eines Magneten bewegt werden, wirken keine Lorentzkräfte mehr. Die freien Elektronen verteilen sich dann wieder gleichmäßig im Leiter, und es besteht keine Spannung mehr zwischen den Leiterenden.

Versuch

Die Leiterschaukel wird aus dem Magnetfeld heraus und wieder hinein bewegt. Dann ändert man durch Umdrehen des Magneten die Richtung des Magnetfeldes.

Beobachtung. Wird die Bewegungsrichtung des Leiters im Magnetfeld oder bei gleicher Bewegungsrichtung die Richtung des Magnetfeldes umgekehrt, so schlägt der Zeiger des Strommessers jeweils in die entgegengesetzte Richtung aus.

Die Richtung des Induktionsstromes hängt offensichtlich von der Bewegungsrichtung des Leiters und von der Richtung des beteiligten Magnetfeldes ab. Sie wird mit Hilfe der Richtung des Zeigerausschlages des Strommessers bestimmt *(Abb. 34.1.)*. Aus dem Versuchsergebnis ist die **UVW-Regel** (**U**rsache – **V**ermittlung – **W**irkung) **der rechten Hand** abgeleitet *(Abb. 34.2.)*.

Spreizt man Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand jeweils rechtwinkelig zueinander und hält den Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters (**U**rsache), den Zeigefinger in die Richtung des Magnetfeldes (**V**ermittlung), so gibt der Mittelfinger die *technische Stromrichtung* (**W**irkung) an.

Die Elektronenstromrichtung *(Abb. 34.1.)* kann mit Hilfe der **UVW-Regel der linken Hand** bestimmt werden: Hält man den Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters (**U**rsache), den Zeigefinger in die Richtung des Magnetfeldes (**V**ermittlung), so gibt der rechtwinkelig abgespreizte Mittelfinger die *Richtung des Elektronenstromes* (**W**irkung) an.

Die Umpolung der Spannung an den Leiterenden bei einer Änderung der Bewegungsrichtung des Leiters im Magnetfeld oder einer Richtungsänderung des Magnetfeldes wird durch entgegengesetzt gerichtete Lorentzkräfte auf die freien Elektronen im Leiter verursacht.

Abb. 34.2. UVW-Regel der rechten Hand

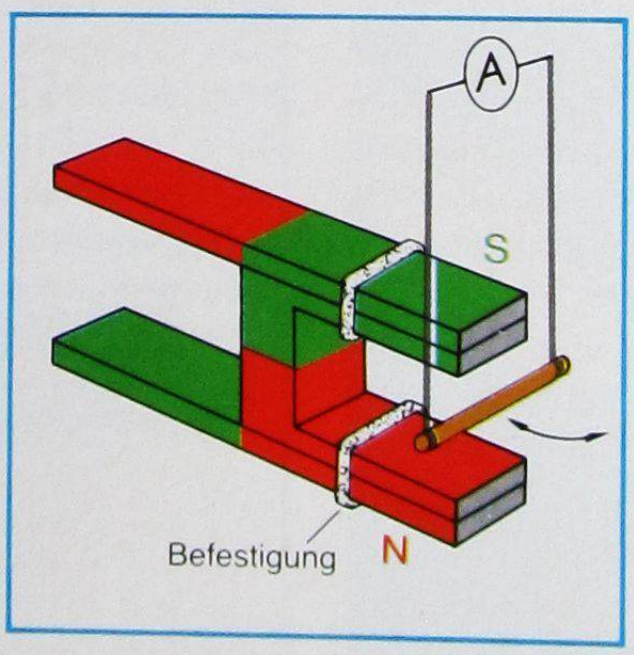


Abb. 34.3. Je stärker das Magnetfeld ist, in dem sich der Leiter bewegt, desto größer ist die Induktionsspannung.

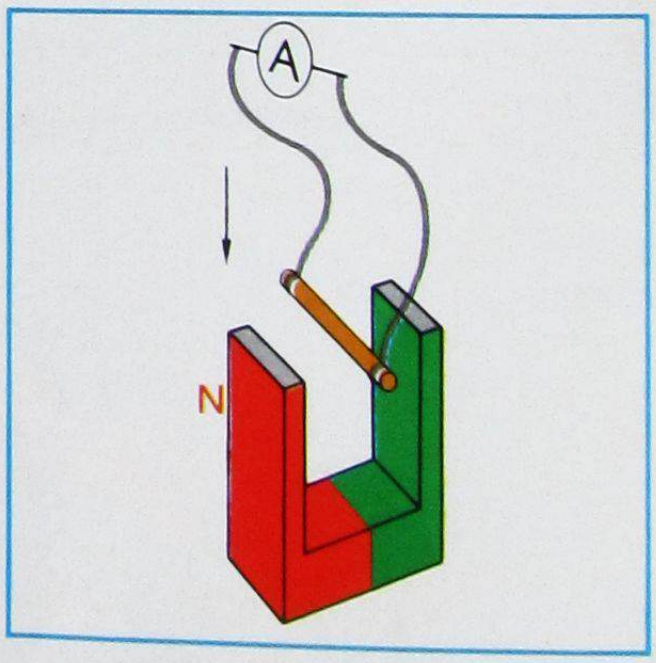


Abb. 34.4. Je schneller das gerade Leiterstück im Magnetfeld bewegt wird, desto größer ist die in ihm induzierte Spannung.

4.I.2. Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Stärke des Magnetfeldes

Versuche

1. Wir wiederholen den Versuch mit der Leiterschaukel *(Abb. 34.1.)*. Dann verstärken wir das Magnetfeld des Hufeisenmagneten, indem wir Stabmagnete an seinen Schenkeln befestigen. Nun bewegen wir die Leiterschaukel mit der gleichen Geschwindigkeit wie vorher wieder senkrecht zu den Feldlinien des Magneten *(Abb. 34.3.)*.

2. Wir stellen nun den Magneten so, dass die Pole nach oben zeigen. Dann lassen wir die Leiterschaukel senkrecht zu den Feldlinien nach unten fallen *(Abb. 34.4.)*.

Beobachtung. Bei jedem Versuch wird der mit der Leiterschaukel verbundene Strommesser beobachtet. Der angezeigte Induktionsstrom I gibt Auskunft über die erzeugte Induktionsspannung U, da im geschlossenen Stromkreis $I \sim U$ ist.

Im Versuch 1. stellen wir fest, dass die Induktionsspannung größer ist, wenn bei gleicher Bewegungsgeschwindigkeit der Schaukel das Magnetfeld stärker ist.

Lassen wir die Leiterschaukel in das Magnetfeld fallen (Versuch 2.), so ist die induzierte Spannung größer als bei der langsameren Bewegung des Leiters mit der Hand im Magnetfeld (vgl. *Abb. 33.1.*).

Zusammenfassung

1. Bei der Bewegung eines Leiters senkrecht zu den Feldlinien eines Magneten entsteht zwischen den Enden des Leiters eine Induktionsspannung und im geschlossenen Stromkreis ein Induktionsstrom.
2. Die technische Richtung des Induktionsstromes ist mit der UVW-Regel der rechten Hand, die Elektronenstromrichtung mit der UVW-Regel der linken Hand feststellbar.
3. Die in einem geraden Leiter erzeugte Induktionsspannung ist umso höher, je stärker das Magnetfeld ist, in dem sich der Leiter bewegt und je größer die Geschwindigkeit des Leiters dabei ist.

Aufgaben

1. a) Wann tritt elektromagnetische Induktion auf?
b) Beschreibe einen Versuch zum Nachweis eines Induktionsstromes in einem einfachen Leiterkreis.
c) Welche Möglichkeiten gibt es in diesem Versuch, die Richtung des Induktionsstromes zu ändern?
2. Wovon hängt die Richtung des Induktionsstromes in einem Leiter ab, der in einem Magnetfeld bewegt wird?
3. Gib die Regel an, mit deren Hilfe
a) die technische Richtung des Induktionsstromes,
b) die Richtung des Elektronenstromes
bei der Induktion in einem im Magnetfeld bewegten Leiter bestimmt werden kann.
4. Erkläre die Entstehung einer Induktionsspannung in einem Leiterstück.
5. Wovon hängt die Induktionsspannung ab, die entsteht, wenn ein gerades Leiterstück im Feld eines Magneten bewegt wird? Beschreibe die jeweilige Abhängigkeit.

4.2. Induktion in Spulen

Zur Erzeugung einer Induktionsspannung kann auch eine Spule *(Induktionsspule)* verwendet werden. Dabei interessieren die folgenden Fragen:

Wann tritt an den Enden einer Spule eine Induktionsspannung auf und wovon hängt sie ab?

Versuch

Ein zu einer Spule gewickeltes Verbindungskabel wird mit einem empfindlichen Spannungsmesser verbunden. Die Spule wird zuerst zu einem Pol des Magneten, dann der Pol des Magneten zur Spule bewegt *(Abb. 36.1.)*.

Beobachtung. Der Spannungsmesser zeigt in beiden Fällen eine größere Spannung an als beim Versuch mit der Leiterschaukel. Folglich ist auch die induzierte Spannung größer. Es ist dabei gleichgültig, ob die Spule zum Magneten oder der Magnet zur Spule bewegt wird: Eine elektrische Spannung wird immer dann induziert, wenn sich Magnet und Spule relativ zueinander bewegen.

Versuch

Drei Spulen (250 Windungen, 500 Windungen, 1000 Windungen) werden hintereinander geschaltet und mit einem Spannungsmesser verbunden. Der Nordpol (oder Südpol) eines Stabmagneten wird nacheinander aus gleicher Höhe in die Spulen fallengelassen *(Abb. 36.2.)*.

Beobachtung. Der Spannungsmesser zeigt beim Eintauchen des Stabmagneten in die einzelnen Spulen eine Induktionsspannung an. Bei größerer Windungszahl der Spule ist auch die induzierte Spannung größer.

Je größer die Windungszahl der Induktionsspule ist, desto höher ist die Induktionsspannung.

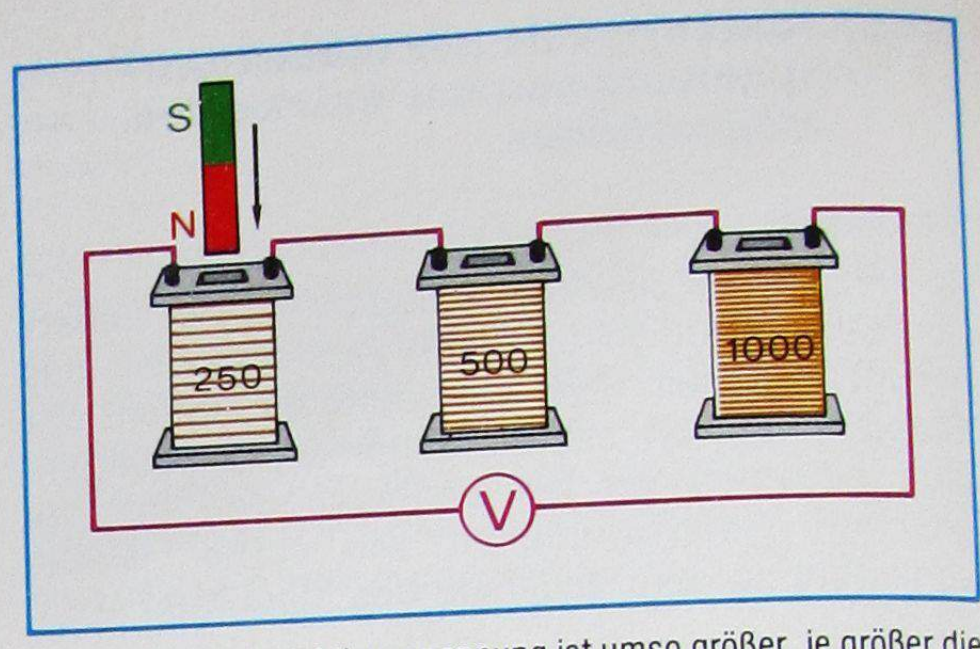


Abb. 36.2. Die Induktionsspannung ist umso größer, je größer die Windungszahl der Spule ist.

Versuch

Ein Pol eines Stabmagneten wird jeweils mit gleicher Geschwindigkeit zunächst einer Induktionsspule genähert und wieder entfernt, dann in die Induktionsspule geschoben und wieder herausgezogen. Jedesmal wird der Zeigerausschlag des an die Spule angeschlossenen Spannungsmessers beobachtet.

Beobachtung. Wird der Magnet ganz in die Spule geschoben und wieder herausgezogen, so ist die Induktionsspannung größer als beim bloßen Annähern an die Spule und anschließendem Entfernen. Ein unbewegter Magnet in der Spule verursacht keine Induktionsspannung. Es muss folglich die Stärke des Magnetfeldes in der Induktionsspule geändert werden, damit eine Spannung induziert wird *(Abb. 36.3.)*.

Je größer dabei die Änderung der Magnetfeldstärke in der gleichen Zeit ist, desto größer ist auch die Induktionsspannung.

Eine Magnetfeldänderung in der Induktionsspule kann aber nicht nur durch Bewegung eines Stab-

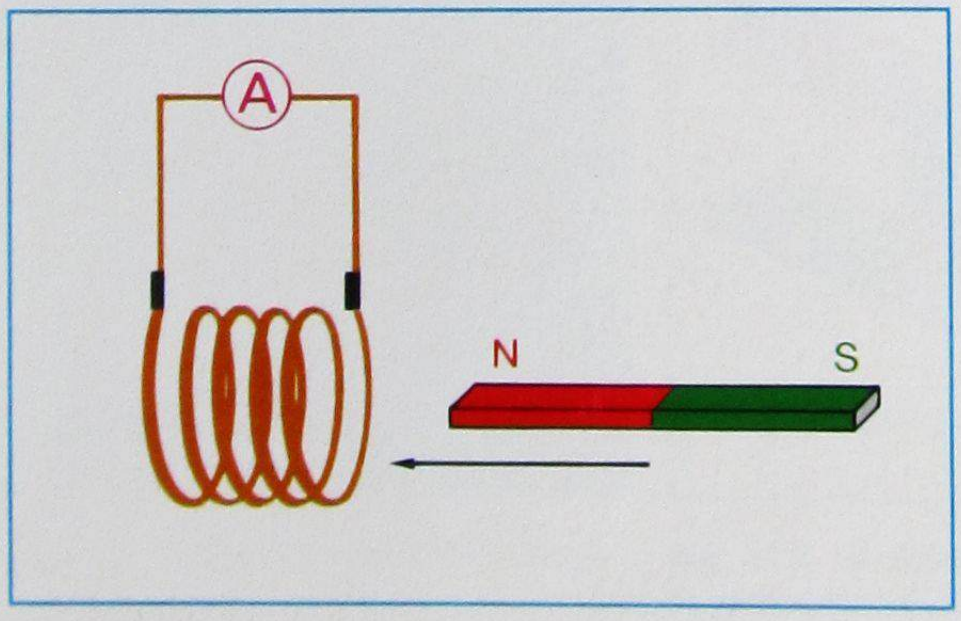


Abb. 36.1. Die in der Spule induzierte Spannung ist größer als beim entsprechenden Versuch mit der Leiterschaukel.

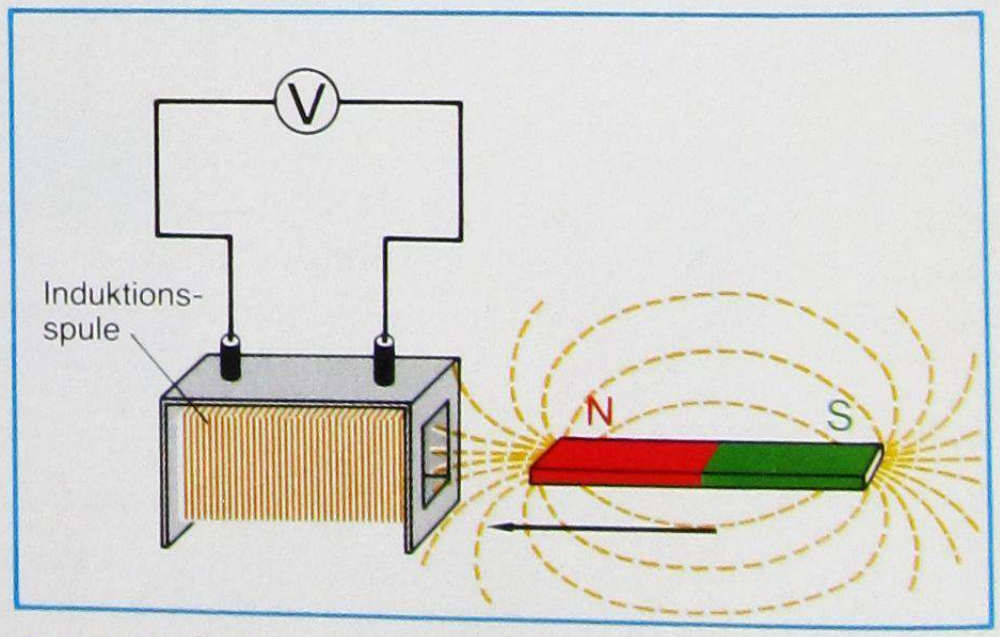


Abb. 36.3. Änderung der Stärke des Magnetfeldes in der Induktionsspule

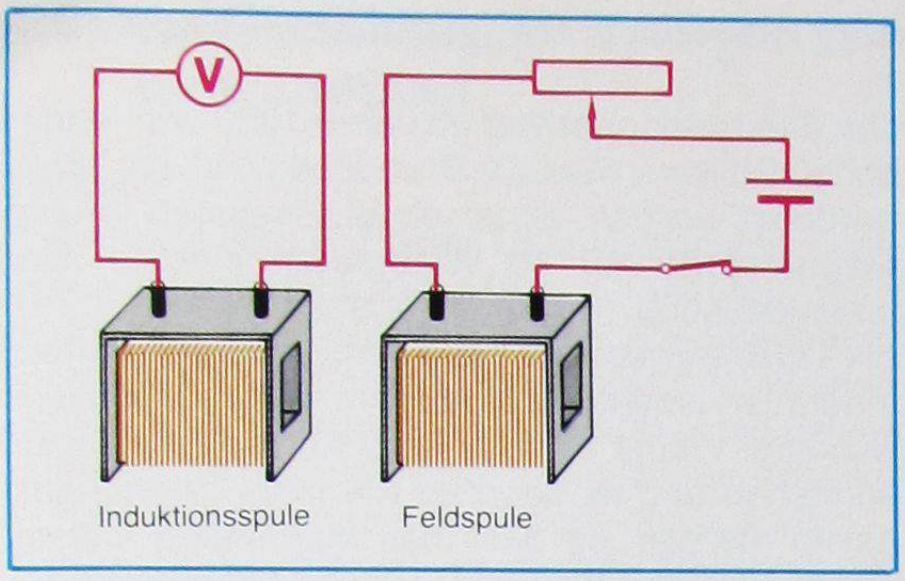


Abb. 37.1. Induktion durch zeitliche Änderung eines Magnetfeldes

magneten in der Spule bewirkt werden, sondern auch mit Hilfe einer sog. *Feldspule (Abb. 37.1.).*

Die von Gleichstrom durchflossene Feldspule wird so vor die Induktionsspule gestellt, dass das Magnetfeld der Feldspule die Induktionsspule durchsetzt. Bei einer Änderung des Stromes in der Feldspule, z. B. mit Hilfe eines Regelwiderstandes, ändert sich die Stärke des Magnetfeldes. Solange das Magnetfeld in der Induktionsspule geändert wird, tritt zwischen deren Enden eine Induktionsspannung auf.

Damit wird nachgewiesen:

In einer Induktionsspule wird dann eine elektrische Spannung induziert, wenn sie von einem sich ändernden Magnetfeld durchsetzt wird.

Je größer die Änderung des Magnetfeldes in einer bestimmten Zeit in der Induktionsspule ist, desto größer ist die Induktionsspannung.

Wenn bei der Entstehung der Induktionsspannung eine Feldspule und eine Induktionsspule beteiligt sind, dann ist eine Bewegung von Magnetfeld oder Induktionsspule nicht mehr notwendig. Die Entstehung der Induktionsspannung kann hierbei nicht mit Kräften auf bewegte Elektronen im Magnetfeld – wie beim Vorgang in der bewegten Leiterschaukel (vgl. Kap. 4.1, S. 33 f.) – gedeutet werden. Es soll hier die Mitteilung genügen, dass bei jeder Änderung des Magnetfeldes ein sich änderndes elektrisches Feld entsteht, das eine Induktionsspannung zur Folge hat.

Versuch

Man lässt nach *Abb. 37.1.* den Strom in der Feldspule mit Hilfe eines Regelwiderstandes langsam auf eine bestimmte Stärke ansteigen und langsam wieder kleiner werden. Dann regelt man den Widerstand so, dass der gleiche maximale Strom wie vorher fließt. Nun öffnet man den Stromkreis in der Feldspule und schließt ihn wieder. Die Größe der induzierten Spannung wird jedesmal mit Hilfe des Voltmeterausschlags festgestellt.
Beobachtung. Beim Öffnen und Schließen des Stromkreises in der Feldspule ist die in der Induktionsspule entstehende Spannung merklich größer als bei langsamer Erhöhung und Schwächung des Stromes über den Regelwiderstand.
Erklärung. Wird der Stromkreis geöffnet bzw. geschlossen, so ändert sich die Stärke des Magnetfeldes in der Induktionsspule sehr rasch. Beim Schließen des Stromkreises steigt die Stärke des Magnetfeldes rasch von Null auf einen bestimmten Wert an, beim Öffnen des Stromkreises wird das Magnetfeld wieder sehr rasch abgebaut. Bei langsamer Änderung des Stromes in der Feldspule ändert sich die Stärke des Magnetfeldes in der Induktionsspule auch langsam; die induzierte Spannung ist entsprechend niedriger. Je rascher sich das Magnetfeld in der Induktionsspule ändert, desto größer ist die Induktionsspannung.

Zusammenfassung

1. In einer Spule entsteht eine Induktionsspannung, wenn sich die Stärke des von ihr umfassten Magnetfeldes zeitlich ändert.
2. Die Höhe der Induktionsspannung hängt von der Windungszahl der Induktionsspule und von der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes in der Induktionsspule ab.

Aufgaben

1. a) Wann entsteht in einer Spule eine Induktionsspannung?
b) Wovon hängt sie ab?
2. Beschreibe die Versuche, die die Abhängigkeiten der in einer Spule entstehenden Induktionsspannung zeigen.
3. Verändert sich die Größe der Induktionsspannung, wenn die Induktionsspule im Versuch nach *Abb. 37.1.* einen Weicheisenkern enthält? Begründung?
4. Erkläre, warum beim Schließen und Öffnen des Stromkreises der Feldspule in der Induktionsspule eine Spannung entsteht, nicht jedoch bei geschlossenem Stromkreis.

Aus der Geschichte der Physik: Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion

Der englische Physiker MICHAEL FARADAY (1791 bis 1867) hatte im Jahr 1821 entdeckt, dass auf einen stromdurchflossenen Draht in einem Magnetfeld Kräfte wirken. Zehn Jahre später kam er auf die Idee, dass ein Magnet in der Lage sein müsse, einen elektrischen Strom zu erzeugen. Um dies nachzuweisen, verwendete er einen Eisenring, um den er zwei Drähte wickelte. Den einen Draht verband er über einen Schalter mit einer Batterie, den zweiten mit einem Galvanometer, das den Stromfluss nachweisen sollte. Beim Schließen des Stromkreises konnte über das Galvanometer ein Strom im zweiten Draht nachgewiesen werden. FARADAY hatte damit die elektromagnetische Induktion als Folge einer Magnetfeldänderung entdeckt und den ersten *elektrischen Transformator* gebaut. Allerdings funktionierte diese Vorrichtung nur beim Öffnen und Schließen des Stromkreises, d. h., nur aufgrund der Änderung des Magnetfeldes. Er erklärte dies mit Hilfe der von ihm eingeführten Kraftlinien. Beim Schließen des Stromkreises entsteht im ersten Stromkreis ein Magnetfeld, dessen Feldlinien sich nach seiner Vorstellung ausbreiten, die Windungen des zweiten Drahtes „durchschneiden" und dadurch einen Strom verursachen. Wird der Stromkreis unterbrochen, ziehen sich die Kraftlinien wieder zurück und durchschneiden wieder die Windungen des zweiten Drahtes. Er überlegte sich nun, dass in einem Metalldraht, der fortlaufend die Kraftlinien eines Magnetfeldes durchschneidet, ein Strom induziert wird. Dazu baute er ein Kupferrad, das zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten gedreht werden konnte und dabei laufend magnetische Kraftlinien durchschnitt. Im Rad floss während der Bewegung ein permanenter Induktionsstrom, der abgeleitet werden konnte. FARADAY hatte damit die elektromagnetische Induktion als Folge der Bewegung eines Leiters im Magnetfeld entdeckt und den ersten *elektrischen Generator* entwickelt.

Bei den Versuchen zur elektromagnetischen Induktion wurden auch Elektromagnete benötigt. Der Elektromagnet war im Jahre 1823 vom englischen Physiker WILLIAM STURGEON (1783 bis 1850) entdeckt worden, als er einen Eisenstab in eine Magnetspule mit 18 Windungen steckte. Der amerikanische Physiker JOSEPH HENRY (1797 bis 1878) verbesserte 1829 den Elektromagneten, indem er isolierten Draht um einen Eisenkern wickelte. Damit konnte kein Kurzschluss mehr entstehen und es konnten viel mehr Windungen gelegt werden, so dass das Magnetfeld stärker wurde.

Im Jahr 1831 erreichte ein Elektromagnet mit Strom aus einer ganz normalen Batterie die Tragkraft von einer Tonne Eisen.

Bei seinen Versuchen zur Verbesserung des Elektromagneten hatte HENRY unabhängig von FARADAY auch die elektromagnetische Induktion entdeckt. Allerdings hatte FARADAY seine Erkenntnisse einige Monate früher als HENRY veröffentlicht, deswegen wird ihm die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion zugeschrieben.

HENRY arbeitete in der ursprünglichen Richtung von FARADAYS Entdeckung weiter, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld Kräfte wirken und hatte die Idee, durch einen elektrischen Strom eine kreisförmige Bewegung zu erzeugen. Er baute eine Maschine, in der sich ein Rad drehte, wenn sie mit Strom gespeist wurde. Damit war der erste *Elektromotor* erfunden.

Elektromotor und *Generator* begründeten das Elektrizitätszeitalter, FARADAY und HENRY gelten gemeinsam als seine Begründer. Durch die Entdeckung des Generators war die Erzeugung billiger Elektrizität in beliebigen Mengen ermöglicht worden. Der Elektromotor gestattete eine sinnvolle Umwandlung der Elektrizität in nutzbare Arbeit. Er ließ sich mit Elektrizität betreiben, die über eine Entfernung von vielen Kilometern zugeführt werden konnte, und er konnte im Gegensatz zu einer Dampfmaschine innerhalb kürzester Zeit ein- und ausgeschaltet werden.

4.3. Lenzsche Regel – Energieumwandlung

Versuch

Eine Spule wird mit einer Litze kurzgeschlossen und entsprechend *Abb. 39.1.* aufgehängt. Man bringt nun den Nordpol eines Stabmagneten rasch in die Öffnung der Spule, zieht ihn ebenso rasch wieder heraus und wiederholt diese Bewegungen. Der Versuch wird anschließend mit dem Südpol des Magneten nochmals durchgeführt.

Beobachtung. Nähert man den Nordpol des Magneten der Spule, so wird sie abgestoßen, entfernt man ihn, so wird sie angezogen. Wenn die Frequenz der Magnetbewegung der Pendelfrequenz der Spule angeglichen wird, dann geht die Spule schließlich mit der Bewegung des Magneten mit. Beim Nähern und Entfernen des Südpols des Magneten ergibt sich das gleiche Ergebnis.

Erklärung. Infolge der Bewegung des Magneten ändert sich die Stärke des von der Spule umfassten Magnetfeldes, so dass in der Spule eine Induktionsspannung erzeugt wird. Es fließt ein Induktionsstrom, da die Spule kurzgeschlossen ist. Dieser Induktionsstrom ruft in der Induktionsspule ein Magnetfeld hervor. Da beim Nähern des Nordpols des Magneten die Spule abgestoßen wird, fließt der Induktionsstrom so, dass an dem Spulenende, das dem Nordpol zugewandt ist, ebenfalls ein Nordpol entsteht *(Abb. 39.2.a).* Wird der Nordpol von der Spule entfernt, so wird diese angezogen. Folglich fließt der Induktionsstrom jetzt so, dass am selben Spulenende ein Südpol entsteht *(Abb. 39.2.b).* Die Abstoßung und Anziehung der Spule bei Verwendung des Südpols des Magneten kann entsprechend erklärt werden *(Abb. 39.2.c).*

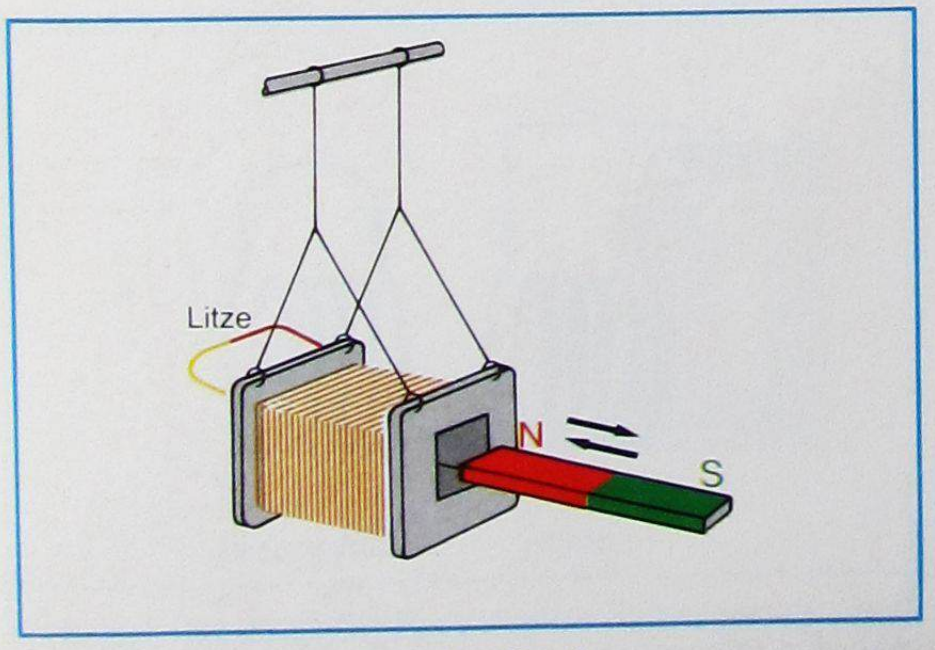


Abb. 39.1. Versuch zur lenzschen Regel

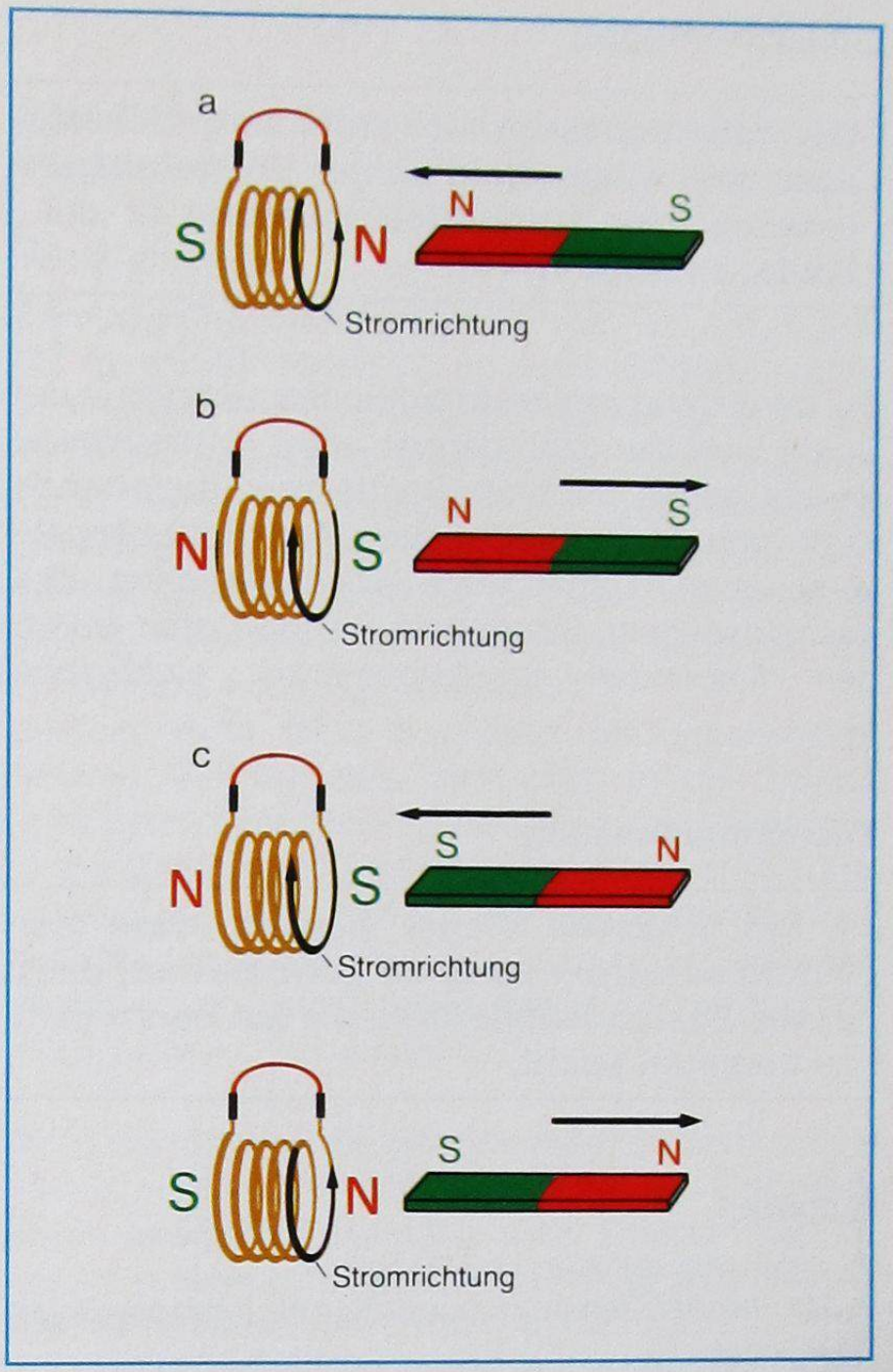


Abb. 39.2. Magnetpole der Induktionsspule und Richtung des Induktionsstromes beim Nähern und Entfernen eines Nordpols (a und b) sowie eines Südpols (c)

Das Magnetfeld des Induktionsstromes in der Spule tritt also mit demjenigen des Stabmagneten in Wechselwirkung. Es treten dabei abstoßende und anziehende Kräfte auf, die jeweils so gerichtet sind, dass die Bewegung des Magneten gehemmt wird. Der Induktionsstrom in der Spule hat folglich jedesmal gerade die Richtung, dass sein Magnetfeld der Magnetfeldänderung des Stabmagneten in der Spule entgegenwirkt.

Der Physiker H. F. LENZ[1] stellte im Jahre 1834 die Regel für die Richtung des Induktionsstromes in der nach ihm benannten **lenzschen Regel** auf. Die lenzsche Regel war nach der Entdeckung der Induktion durch MICHAEL FARADAY ein weiterer wichtiger Schritt zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion und ihrer Erscheinungen.

[1] HEINRICH FRIEDRICH LENZ (1804 bis 1865), russischer Physiker deutscher Herkunft

Lenzsche Regel:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass sein Magnetfeld seiner Entstehungsursache, der Magnetfeldänderung in der Spule, entgegenwirkt.

Bei der Erzeugung der Induktionsspannung in der Spule wird der Stabmagnet unter Kraftaufwand jeweils gegen die abstoßende bzw. anziehende Kraft des Magnetfelds des Induktionsstromes verschoben. Dabei wird Arbeit verrichtet. Bei geschlossenem Stromkreis wandelt sich durch den fließenden Induktionsstrom elektrische Energie in andere Energieformen um (z. B. in Bewegungsenergie bei Elektromotoren, in Wärme bei elektrischen Heizgeräten, in Strahlungsenergie bei Glühlampen). Beim Induktionsvorgang wird durch Verrichten von Arbeit mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Das Prinzip von der Erhaltung der Energie gilt auch bei der elektromagnetischen Induktion. Die lenzsche Regel und der Satz von der Energieerhaltung bei der elektromagnetischen Induktion sagen das Gleiche aus. Aus der lenzschen Regel folgt damit auch, dass sich ein fließender Strom durch Induktion nicht noch selbst verstärken kann.

Zusammenfassung

1. Die lenzsche Regel besagt, dass der Induktionsstrom stets so gerichtet ist, dass er die Zustandsänderung, die ihn hervorruft, zu hemmen sucht.

2. Auch für die elektromagnetische Induktion gilt somit das Prinzip von der Erhaltung der Energie.

Aufgaben

1. Wie lautet die lenzsche Regel?
2. Mit welchen Versuchen kann man die lenzsche Regel nachweisen?
3. Was ist über die Energieumwandlung beim Induktionsvorgang auszusagen?
4. Ein an einer Schnur aufgehängter Aluminiumring und eine Spule mit Weicheisenkern sind entsprechend *Abb. 40.1.* angeordnet. Beschreibe und erkläre das Verhalten des Ringes beim Schließen und Öffnen des Gleichstromkreises.
5. Die in *Abb. 40.2.* dargestellte Feldspule ist an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Welche Erscheinung tritt in der (nicht beweglichen) Induktionsspule auf,
a) wenn der Stromkreis der Feldspule geöffnet, dann wieder geschlossen wird?
b) wenn die stromdurchflossene Feldspule der Induktionsspule genähert, dann wieder von ihr entfernt wird?
c) wenn die Lage der von (konstantem) Strom durchflossenen Feldspule nicht geändert wird? Begründe jeweils die Antwort.
Übertrage zur Beantwortung der Frage b) die Skizzen der Spulen ins Heft und gib jeweils die Magnetpolungen und Stromrichtungen bei den Spulen an.
6. Eine kurzgeschlossene Spule liegt mit ihrer Öffnung nach oben auf einer elektronischen Präzisionswaage. Der Spule wird senkrecht von oben der Nordpol eines Stabmagneten genähert. Was kann man beobachten und wie ist diese Beobachtung zu erklären? Ändert sich etwas, wenn man den Südpol des Magneten nähert? Begründung?

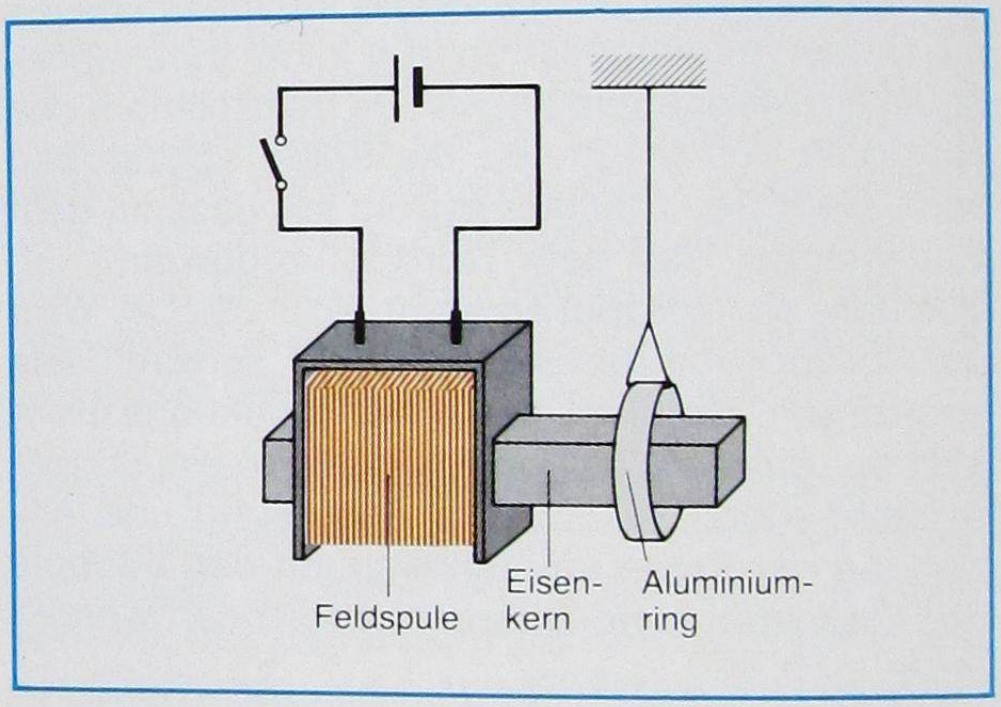


Abb. 40.1. Zu Aufgabe 4

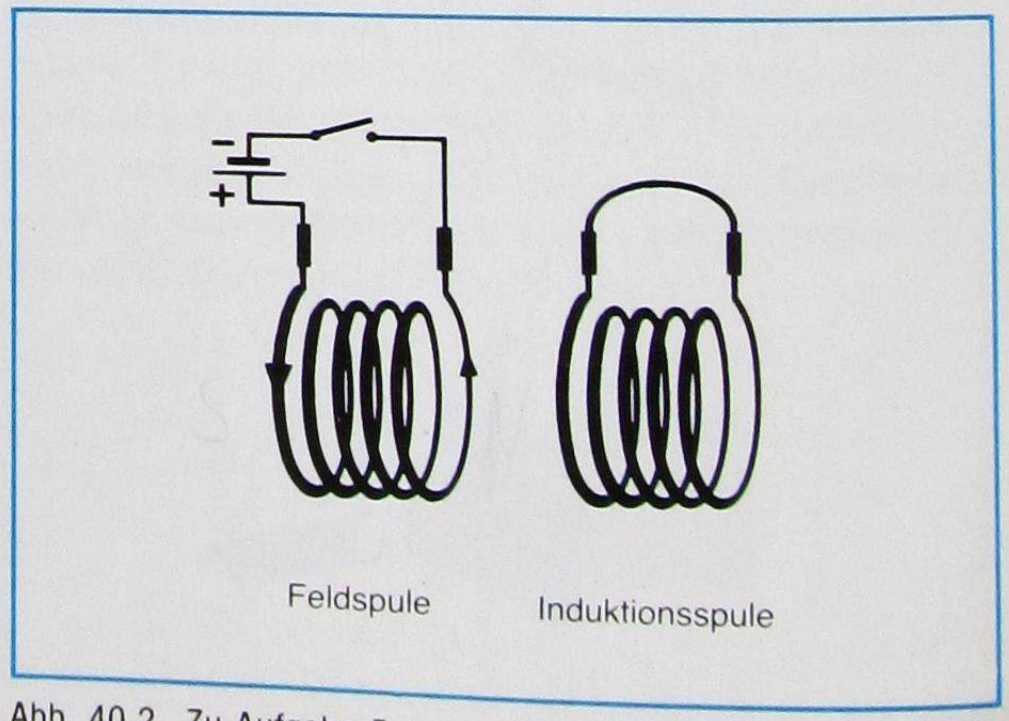


Abb. 40.2. Zu Aufgabe 5

4.4. Selbstinduktion

Wie die bisherigen Versuche gezeigt haben, entsteht in einer Spule eine Induktionsspannung, wenn sich in ihr ein Magnetfeld zeitlich ändert (vgl. Kap. 4.2.). Im Folgenden werden die Wirkungen von Spulen mit zeitlich sich änderndem Magnetfeld im Gleich- und Wechselstromkreis untersucht.

4.4.1. Wirkung der Selbstinduktion in einem Gleichstromkreis

Versuch

Eine Spule (1000 Windungen) wird auf einen Schenkel eines U-Kerns geschoben, mit einem Strommesser und einem Regelwiderstand hintereinander geschaltet und an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Der Widerstand wird so eingestellt, dass nur ein kleiner Strom fließt. Nun wird das Joch auf den U-Kern aufgelegt *(Abb. 41.1.)* und anschließend wieder abgezogen; dabei wird der Strommesser beobachtet.
Beobachtung. Der Strommesser zeigt zunächst einen bestimmten Strom im geschlossenen Stromkreis an. Beim Auflegen des Jochs auf den U-Kern nimmt die Stromstärke kurzzeitig ab, beim Abziehen des Jochs vom U-Kern steigt sie kurzzeitig an. Durch das Auflegen des Joches auf den U-Kern und sein Abziehen wird das Magnetfeld im U-Kern und damit auch das Magnetfeld, das die Spule durchsetzt, geändert. Die Magnetfeldänderung bewirkt in der Spule eine Induktionsspannung. Dadurch wird offensichtlich kurzzeitig der Strom in der Spule geschwächt bzw. verstärkt.

Eine Magnetfeldänderung in der Spule kann auch durch Änderung des Spulenstromes (z. B. beim Schließen und Öffnen des Stromkreises) bewirkt werden.

Versuch

Zwei gleiche Glühlampen G_1 und G_2 (z. B. 3,6 V/0,3 A) werden parallel an eine Batterie angeschlossen. In die Zweigleitung mit G_1 wird ein Regelwiderstand, in die Zweigleitung mit G_2 eine Spule (1000 Windungen) mit geschlossenem Eisenkern eingebaut *(Abb. 41.2.)*. Der Widerstand wird so geregelt, dass G_1 genauso hell leuchtet wie G_2. Nun wird der Stromkreis geöffnet, anschließend wieder geschlossen.
Beobachtung. Beim Schließen des Gleichstromkreises leuchtet das Lämpchen in der Zweigleitung mit dem Widerstand sofort, das Lämpchen in der Zweigleitung mit der Spule erst einige Zeit später auf. Der Strom im Widerstandszweig erreicht somit seinen Höchstwert sofort, während der Strom im Spulenzweig seinen Höchstwert erst nach einiger Zeit erreicht.

Wird der Stromkreis geschlossen, so baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf, das vom Eisenkern noch wesentlich verstärkt wird. Dieses Magnetfeld durchsetzt die Spule und erzeugt während der Zunahme seiner Stärke von Null bis zum Maximalwert eine Induktionsspannung in der Spule. Da diese Spannung in der felderzeugenden Spule selbst entsteht, bezeichnet man sie als *Selbstinduktionsspannung*. Sie ist nach der lenzschen Regel beim Schließen des Stromkreises der am Spulenzweig anliegenden Batteriespannung entgegengerichtet und verursacht das langsame Anwachsen des Stromes im Spulenzweig. Diese Induktionswirkung heißt **Selbstinduktion.**

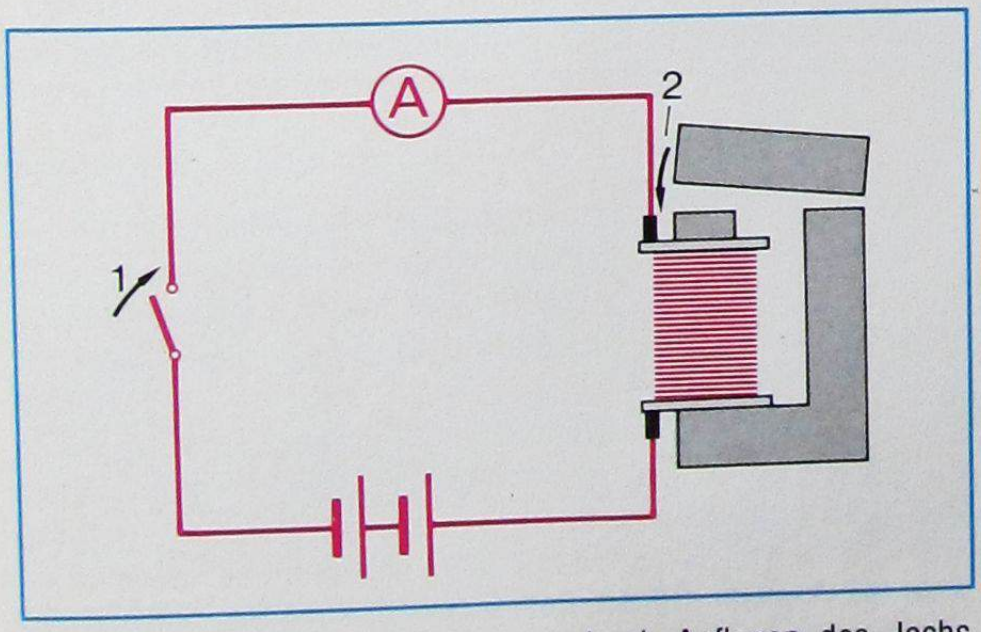


Abb. 41.1. Die Magnetfeldänderung durch Auflegen des Jochs bewirkt eine Induktionsspannung in der Spule.

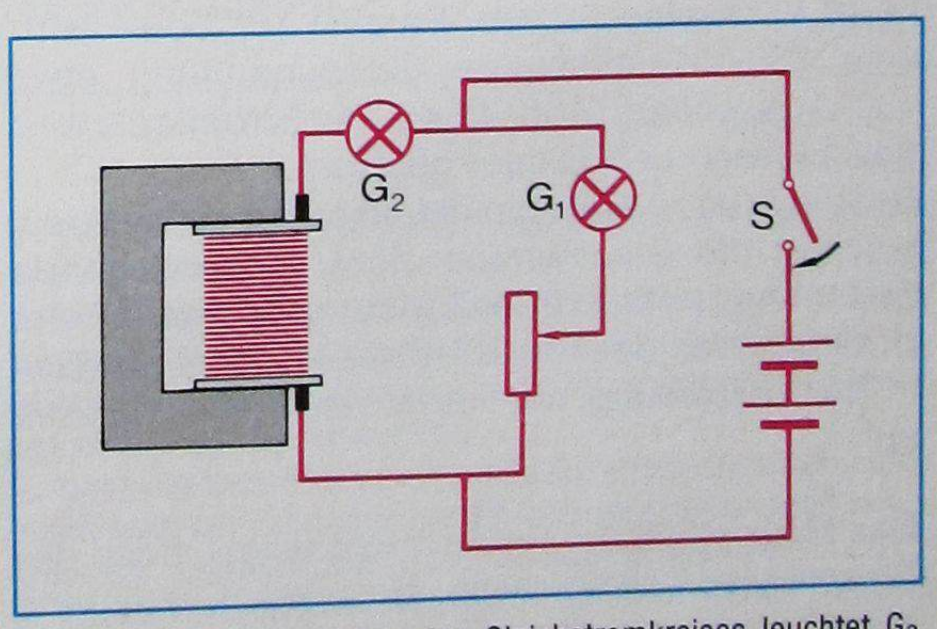


Abb. 41.2. Beim Schließen des Gleichstromkreises leuchtet G_2 infolge der Selbstinduktion der Spule später auf als G_1.

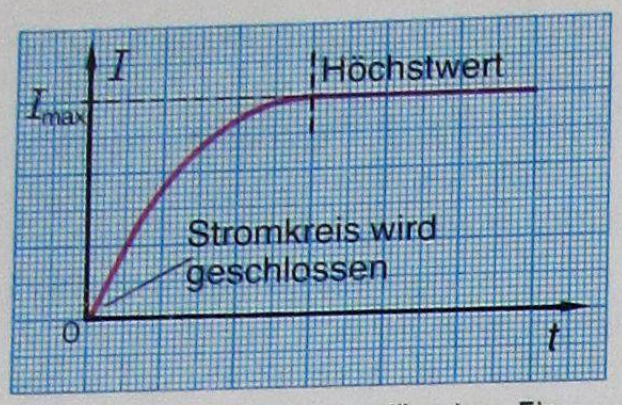


Abb. 42.1. *t-I*-Diagramm für den Einschaltstrom in einem Gleichstromkreis mit Spule

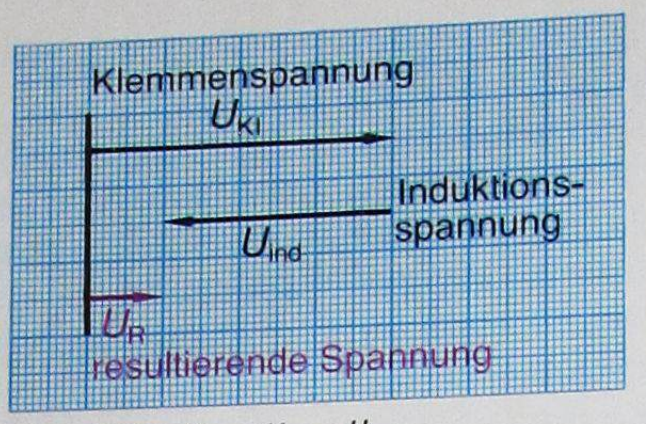


Abb. 42.2. $U_R = U_{kl} - U_{ind}$

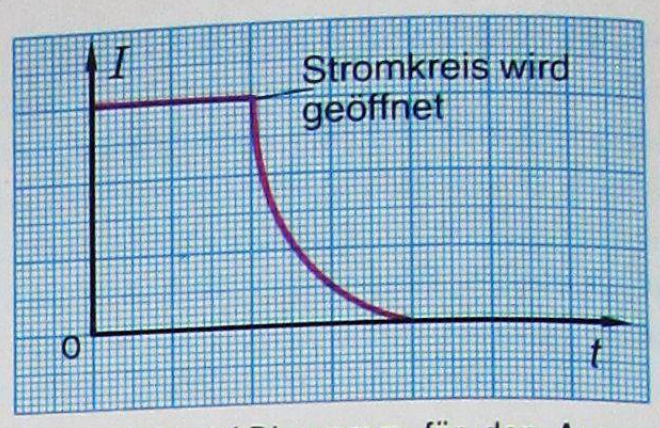


Abb. 42.3. *t-I*-Diagramm für den Ausschaltstrom in einem Gleichstromkreis mit Spule

In *Abb. 42.1.* ist der zeitliche Verlauf des Stromes im Spulenzweig beim Schließen des Gleichstromkreises dargestellt.

Die Selbstinduktionsspannung ist im Augenblick des Einschaltens am größten und die aus der anliegenden Betriebsspannung und der entgegengerichteten Induktionsspannung resultierende Spannung am kleinsten *(Abb. 42.2.)*. Im Laufe der Zeit wird die Induktionsspannung immer kleiner, die resultierende Spannung größer. Mit der resultierenden Spannung wächst auch der Strom im Spulenzweig. Wenn der Aufbau des Magnetfeldes der Spule beendet ist, ist auch der Induktionsvorgang beendet, d. h., es wird keine Gegenspannung mehr induziert. Der Strom hat dann seinen Höchstwert, und das Lämpchen leuchtet so hell wie das im Widerstandszweig.

Bei Spulen mit geschlossenem Eisenkern, großer Windungszahl und geringem ohmschen Widerstand ist die Selbstinduktion groß. Es kann u. U. Minuten dauern, bis die volle Stromstärke im Spulenzweig erreicht ist.

Versuch

Eine Spule (1000 Windungen) mit geschlossenem Eisenkern wird über einen Schalter an eine Batterie (6 V) angeschlossen. Parallel zur Spule wird eine 230-V-Glimmlampe (Zündspannung etwa 130 V) geschaltet *(Abb. 42.4.)*. Der Stromkreis wird geschlossen und wieder geöffnet.
Beobachtung. Bei geschlossenem Stromkreis leuchtet die Glimmlampe nicht; die anliegende Spannung reicht zu ihrer Zündung nicht aus. Beim Unterbrechen des Stromkreises leuchtet das Gas in der Umgebung der negativen Elektrode kurz auf.

Das Magnetfeld der Spule bricht beim Öffnen des Stromkreises sehr rasch zusammen. Während dieser Änderung des Magnetfeldes in der Spule entsteht in ihr eine Selbstinduktionsspannung, die größer als die Zündspannung der Lampe ist. Nach der lenzschen Regel wirkt sie ihrer Ursache, nämlich dem raschen Absinken des Stromes, entgegen und verursacht so ein kurzzeitiges Weiterfließen des Stromes nach dem Öffnen des Stromkreises. In *Abb. 42.3.* ist der zeitliche Verlauf des Stromes beim Öffnen des Gleichstromkreises mit Spule dargestellt.

Die induzierte sog. *Öffnungsspannung* ist der an der Spule anliegenden Spannung gleichgerichtet. In Spulen mit geschlossenem Eisenkern, hoher Windungszahl und kleinem ohmschen Widerstand können große Öffnungsspannungen entstehen. Sie bewirken zwischen den Schaltkontakten im Stromkreis sog. *Öffnungsfunken*, die bei häufiger Betätigung der Schalter die Kontakte allmählich zerstören können.

4.4.2. Wirkung der Selbstinduktion in einem Wechselstromkreis

Versuche

1. Ein Glühlämpchen (z. B. 4,5 V/0,4 W) wird zuerst mit einer Gleichspannungsquelle, dann mit einer Wechselspannungsquelle von jeweils gleicher Spannung verbunden.

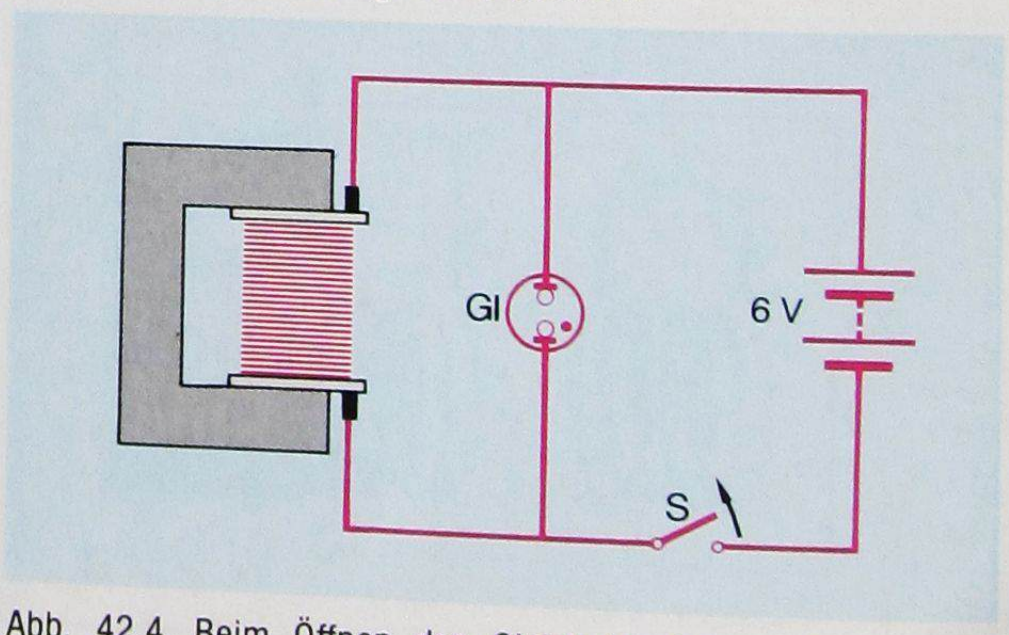


Abb. 42.4. Beim Öffnen des Gleichstromkreises leuchtet die Glimmlampe infolge der entstehenden Selbstinduktionsspannung auf.

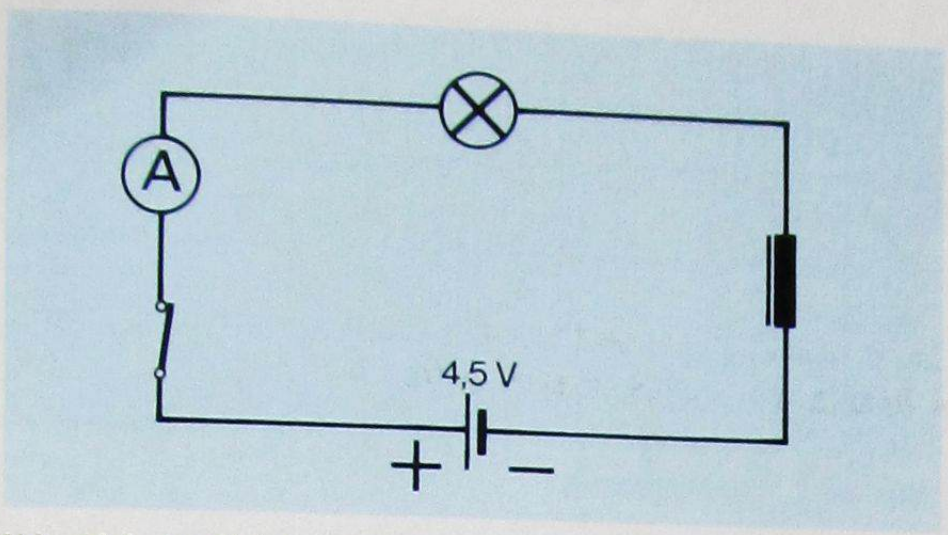


Abb. 43.1. Im Gleichstromkreis leuchtet das Glühlämpchen.

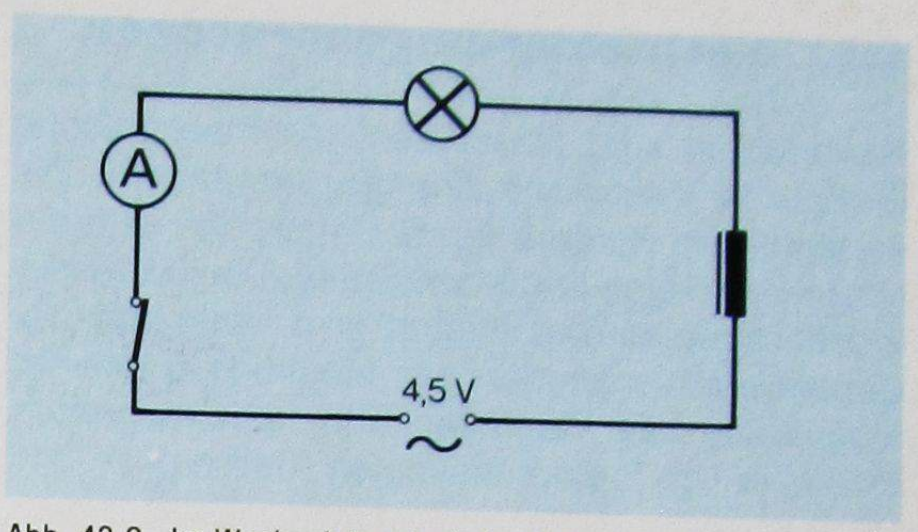


Abb. 43.2. Im Wechselstromkreis leuchtet das Lämpchen infolge der Selbstinduktion der Spule nicht.

2. Das Glühlämpchen wird mit einer Spule mit geschlossenem Eisenkern und einem Strommesser in Reihe geschaltet und wieder zuerst an die Gleichspannungsquelle *(Abb. 43.1.)*, dann an die Wechselspannungsquelle angeschlossen *(Abb. 43.2.)*.

Beobachtungen. Im Versuch 1. leuchtet das Lämpchen im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis gleich hell. Befindet sich die Spule mit Eisenkern im Stromkreis (Versuch 2.), so leuchtet das Lämpchen im Gleichstromkreis fast so hell wie vorher; im Wechselstromkreis bleibt es dagegen dunkel. Im Wechselstromkreis mit Spule fließt folglich ein kleinerer Strom als im Gleichstromkreis mit Spule oder im Wechselstromkreis ohne Spule. Die Ursache für die Abnahme des Stromes ist die durch die Spule verursachte Selbstinduktionsspannung. Der Wechselstrom (f = 50 Hz) ändert ständig sehr rasch seine Richtung und seine Stärke. Er erzeugt folglich ein magnetisches Wechselfeld. Dieses durchsetzt die felderzeugende Spule und induziert in ihr fortlaufend eine Spannung.

Die Selbstinduktionsspannung ist der angelegten Wechselspannung entgegengerichtet und bewirkt eine andauernde Verringerung des Stromes im Wechselstromkreis. Eine Spule im Wechselstromkreis besitzt neben ihrem ohmschen Widerstand deshalb noch einen sog. induktiven Widerstand; sie wird auch *Drosselspule* genannt.

Drosselspulen mit geschlossenem Eisenkern und hoher Windungszahl haben einen großen induktiven Widerstand. Da sie sich bei Betrieb kaum erwärmen, ist der Energieverlust in ihnen gering.

Zusammenfassung

1. Die Induktionswirkung einer stromdurchflossenen Spule auf ihren eigenen Stromkreis wird als Selbstinduktion bezeichnet.
2. In einem Gleichstromkreis verzögert die Selbstinduktion beim Schließen des Stromkreises das Anwachsen des Stromes; beim Öffnen des Stromkreises wird die Abnahme der Stromstärke verzögert.
3. In einem Wechselstromkreis mit einer Spule verringert die Selbstinduktion dauernd die Stromstärke.

Aufgaben

1. Wann entsteht Selbstinduktion?
2. Was verstehen wir unter Selbstinduktion?
3. Beschreibe anhand von Skizzen einen Versuch zum Nachweis der Selbstinduktion in einem Gleichstromkreis.
a) beim Schließen des Stromkreises,
b) beim Öffnen des Stromkreises.
Erkläre das jeweilige Versuchsergebnis. Skizziere jeweils den Verlauf des Stromes in Abhängigkeit von der Zeit.
4. Welche nachteilige Wirkung kann die Öffnungsspannung haben?
5. Wodurch kann die Selbstinduktion einer Spule erhöht werden?
6. Legt man im Versuch, dessen Aufbau in *Abb. 41.1.* dargestellt ist, das Joch auf, nimmt der Spulenstrom kurzzeitig ab, zieht man das Joch ab, nimmt der Spulenstrom kurzzeitig zu. Erkläre.
7. Beschreibe anhand einer Skizze einen Versuch zum Nachweis der Selbstinduktion in einem Wechselstromkreis mit Spule. Erkläre das Versuchsergebnis.
8. Warum bezeichnet man eine Spule in einem Wechselstromkreis als Drosselspule?

4.5. Wechselstromgeneratoren

Generatoren sind Maschinen, die mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln. Die wesentlichen Bauteile eines Generators sind ein Magnet und eine Induktionsspule. Damit ständig Induktionsspannung erzeugt wird, lässt man bei Generatoren entweder die Induktionsspule im Magnetfeld des Magneten oder den Magneten innerhalb von Induktionsspulen rotieren.

4.5.1. Die Entstehung der Wechselspannung

Die Funktionsweise eines Wechselstromgenerators kann leichter erklärt werden, wenn wir zunächst statt der Induktionsspule nur eine rechteckige Leiterschleife *(Abb. 44.1.)* verwenden.

Versuch

Eine rechteckige Leiterschleife ist drehbar zwischen den Polen eines Magneten angeordnet *(Abb. 44.1.)*. Ihre Enden sind mit Schleifringen verbunden, die auf einer gemeinsamen Achse sitzen und voneinander isoliert sind. Zur Stromabnahme liegt an jedem Schleifring ein federnder Kontakt, eine sog. Abnehmerbürste, an. Die Leiterschleife wird langsam und gleichmäßig gedreht. Dabei wird der Zeigerausschlag des angeschlossenen Spannungsmessers beobachtet.

Beobachtung. Während der Drehung der Leiterschleife im Magnetfeld pendelt der Zeiger des Spannungsmessers hin und her. Bei einer vollen Umdrehung wächst die Spannung zunächst von Null bis zu einem Maximum an, sinkt dann wieder auf Null ab, wächst nun auf der anderen Seite der Nulllage bis zu einem Höchstwert an und sinkt wieder auf Null ab.

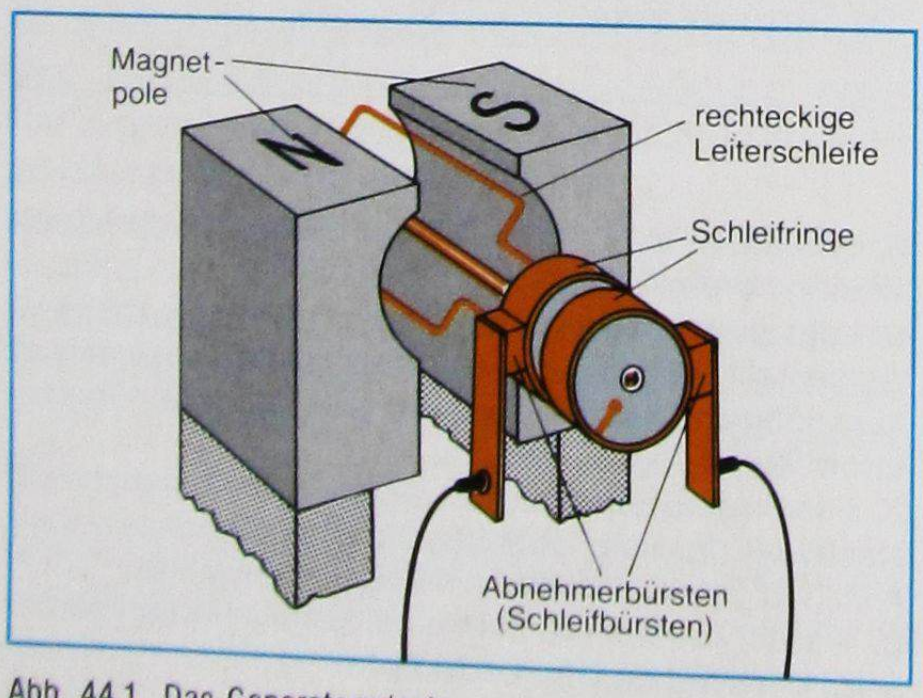


Abb. 44.1. Das Generatorprinzip

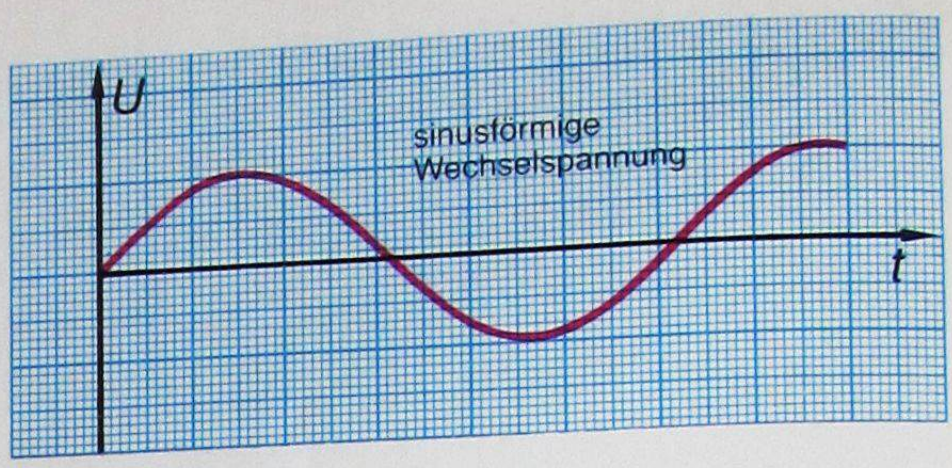


Abb. 44.2. *t-U*-Diagramm

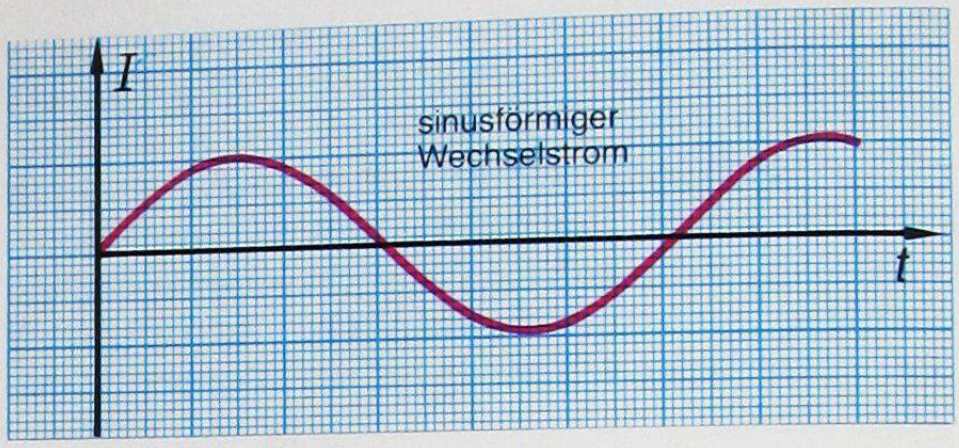


Abb. 44.3. *t-I*-Diagramm

Die auf diese Weise erzeugte Spannung heißt **Wechselspannung**, den bei geschlossenem Leiterkreis dabei fließenden Strom bezeichnen wir als **Wechselstrom**.

Ersetzt man im Versuchsaufbau nach *Abb. 44.1.* die Leiterschleife durch eine Induktionsspule und das Spannungsmessgerät durch ein Oszilloskop, so erscheint als Schirmbild eine Sinuslinie *(Abb. 44.2.)*.

Sie stellt den zeitlichen Verlauf der erzeugten Induktionsspannung dar. Man nennt sie deshalb sinusförmige Wechselspannung; bei geschlossenem Leiterkreis fließt dann ein sinusförmiger Wechselstrom. Das entsprechende *t-I*-Diagramm ist ebenfalls eine Sinuslinie *(Abb. 44.3.)*.

Bei der sich drehenden Leiterschleife ergibt sich zu verschiedenen Zeitpunkten während einer vollen Umdrehung im Magnetfeld für die dabei erzeugte Induktionsspannung folgende Darstellung *(Abb. 45.1.)*:

In Stellung I wird keine Spannung induziert, weil die Leiterstücke a und b sich gerade parallel zu den Feldlinien des Magneten bewegen. Auf die freien Elektronen in den Leiterstücken wirkt in diesem Fall keine Lorentzkraft; es kommt folglich zu keiner Ladungsverschiebung im Leiter, die Spannung ist deshalb Null.

Bei der Drehung der Schleife von Stellung I nach Stellung III bewegen sich die Leiterstücke a und b schräg zu den Feldlinien. Je größer dabei der

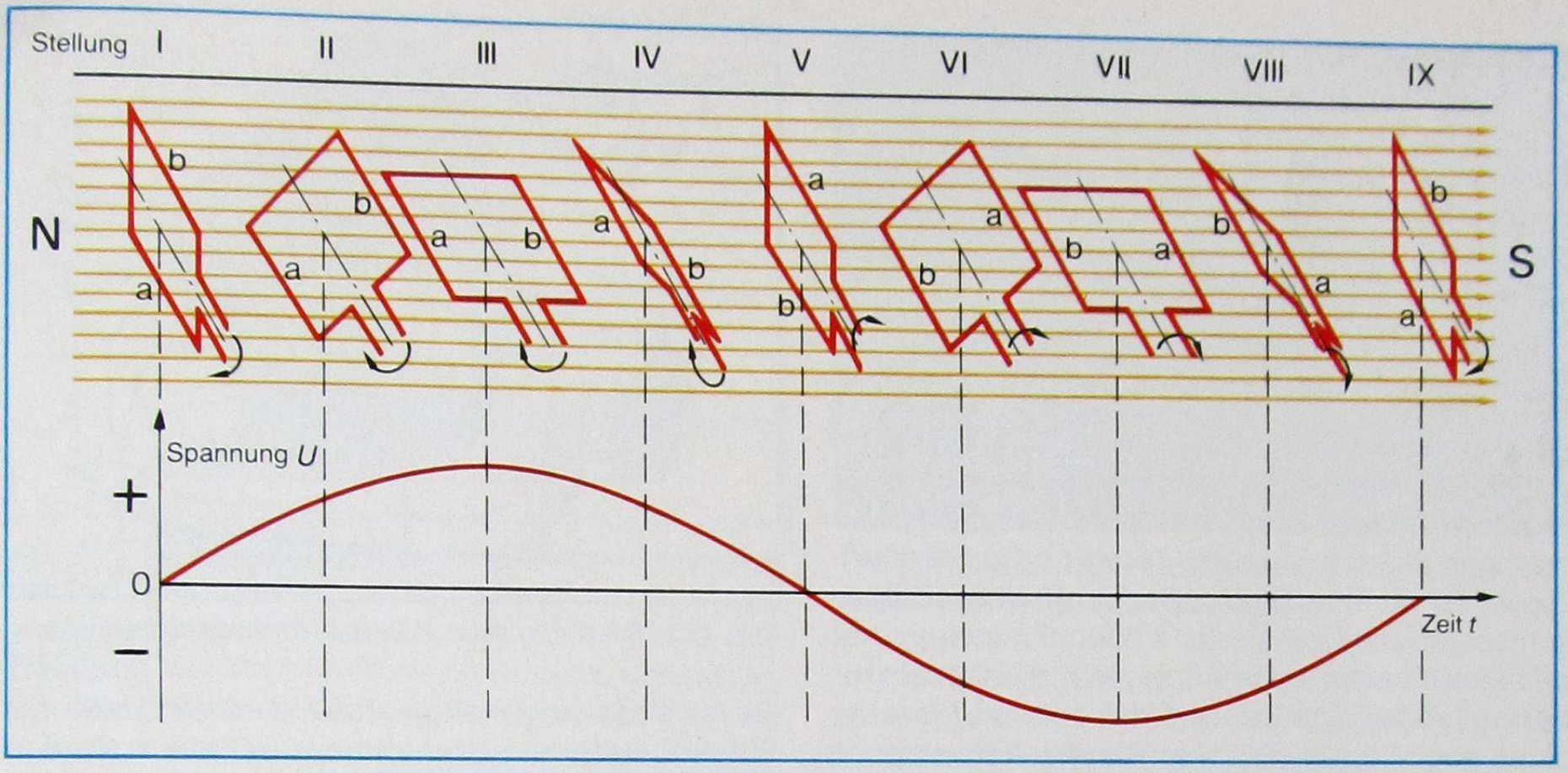


Abb. 45.1. Während ihrer Drehung im Magnetfeld wird an den Enden einer Leiterschleife eine Wechselspannung erzeugt.

Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Leiterstücke und den Feldlinien ist, desto größer ist die auf die Leitungselektronen wirkende Lorentzkraft. Im Leiterstück a werden die Elektronen von hinten nach vorne, im Leiterstück b von vorne nach hinten verschoben. Die in der Leiterschleife induzierte Spannung wächst sinusförmig von Null bis zu einem Höchstwert an.

In Stellung III – nach einer Drehung der Leiterschleife um 90° – bewegen sich die Leiterstücke a und b gerade senkrecht zu den Feldlinien. Die Lorentzkraft und die Induktionsspannung sind dabei am größten.

Zwischen den Stellungen III und IV bewegen sich die Leiterstücke a und b wieder schräg zu den Feldlinien, mit stets kleiner werdenden Winkeln zwischen der Bewegungsrichtung der Leiterstücke und den Feldlinien. Die Lorentzkraft auf die Leitungselektronen wird dabei kleiner; die erzeugte Induktionsspannung geht vom höchsten Wert auf Null zurück.

In Stellung V – also nach einer Drehung der Leiterschleife um 180° – bewegen sich die Leiterstücke für einen Augenblick in Richtung der Feldlinien. Dadurch wirkt keine Lorentzkraft auf die Elektronen; es entsteht keine Induktionsspannung.

Bei der Drehung der Leiterschleife über 180° hinaus ändert sich die Bewegungsrichtung der Leiterstücke a und b in Bezug auf die Richtung der Feldlinien. Auf die Leitungselektronen in den bewegten Leiterstücken a und b wirken jetzt die Lorentzkräfte in der entgegengesetzten Richtung wie vorher. Die erzeugte Induktionsspannung und damit auch der Induktionsstrom kehren ihre Richtungen um *(UVW-Regel der rechten Hand)*.

Die Zunahme der Induktionsspannung bis zum Maximalwert und Abnahme bis Null bei der Drehung der Leiterschleife von 180° bis 360° (Stellung VI bis IX) kann entsprechend erklärt werden wie vorher bei der Drehung der Schleife von 0° bis 180°.

Bei der Drehung der Leiterschleife im Magnetfeld ist für jeweils eine halbe Umdrehung abwechselnd ein Leiterende Pluspol, das andere Minuspol. Bei einer vollen Umdrehung der Leiterschleife entsteht eine Periode der Wechselspannung.

Zusammenfassung

1. Rotiert eine Leiterschleife in einem Magnetfeld, so wird in ihr eine Wechselspannung induziert.

2. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass sie periodisch Größe und Richtung ändert und sich graphisch als eine Sinuskurve darstellt.

4.5.2. Technische Wechselstrom-generatoren

Wechselstromgeneratoren, die kleine oder mittlere Leistungen abgeben, sind i. A. als *Außenpolgeneratoren*, solche mit hoher Leistungsabgabe als *Innenpolgeneratoren* gebaut.

Außenpolgenerator *(Abb. 46.1.)*

Beim Außenpolgenerator ist die Induktionsspule auf einen geblätterten Weicheisenkern gewickelt und liegt drehbar zwischen den *Polschuhen* eines kräftigen Elektromagneten (*Stator* oder *Ständer*). Dieser ist an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die Drehspule mit dem Eisenkern und den zwei *Schleifringen* bezeichnet man als *Anker (Rotor, Läufer)*. Der Generator in *Abb. 46.1.* besitzt einen sog. *Doppel-T-Anker.* Der Spulenkern aus Eisen bewirkt eine Verstärkung des Magnetfeldes in der Spule. Durch Verwendung der Polschuhe wird der Luftspalt zwischen den Magnetpolen und dem Anker klein gehalten, so dass der Verlauf des Magnetfeldes praktisch nicht beeinflusst wird. Die *Schleifringe* sitzen auf der Ankerachse, sind isoliert und mit je einem Spulenende verbunden.

Bei der Drehung des Ankers im Magnetfeld wird in den Ankerwicklungen eine Wechselspannung induziert (vgl. *Abb. 45.1.*). Bei einer vollen Umdrehung des Ankers entsteht eine Periode der Wechselspannung (vgl. *Abb. 45.1.*). Die **technische Wechselspannung**, die in den Elektrizitätswerken erzeugt wird, besitzt 50 Perioden in der Sekunde. Man sagt dafür: sie hat eine Frequenz von 50 Hertz ($f = 50$ Hz). Da in jeder Periode die Wechselspannung zweimal die Polarität wechselt, ändert ein zugehöriger Wechselstrom auch zweimal die Richtung, in der Sekunde somit hundertmal. Mit Schleifbürsten aus Kohle oder Kupfer, die mit Federn an die sich drehenden Schleifringe gedrückt werden, wird die leitende Verbindung der Induktionsspule mit einem Stromkreis hergestellt.

Der Außenpolgenerator ist infolge seiner Bauweise in seiner Leistungsabgabe begrenzt. Zur Erhöhung der Induktionsspannung müsste die Windungszahl der Läuferspule erhöht werden. Dadurch würde aber das Ankergewicht zu groß werden, so dass bei hohen Drehzahlen des Ankers die Achsenlagerung Probleme schaffen würde. Der Doppel-T-Anker muss zur Erzeugung des **technischen Wechselstromes** ($f = 50$ Hz) 3000 Umdrehungen in der Minute ausführen.

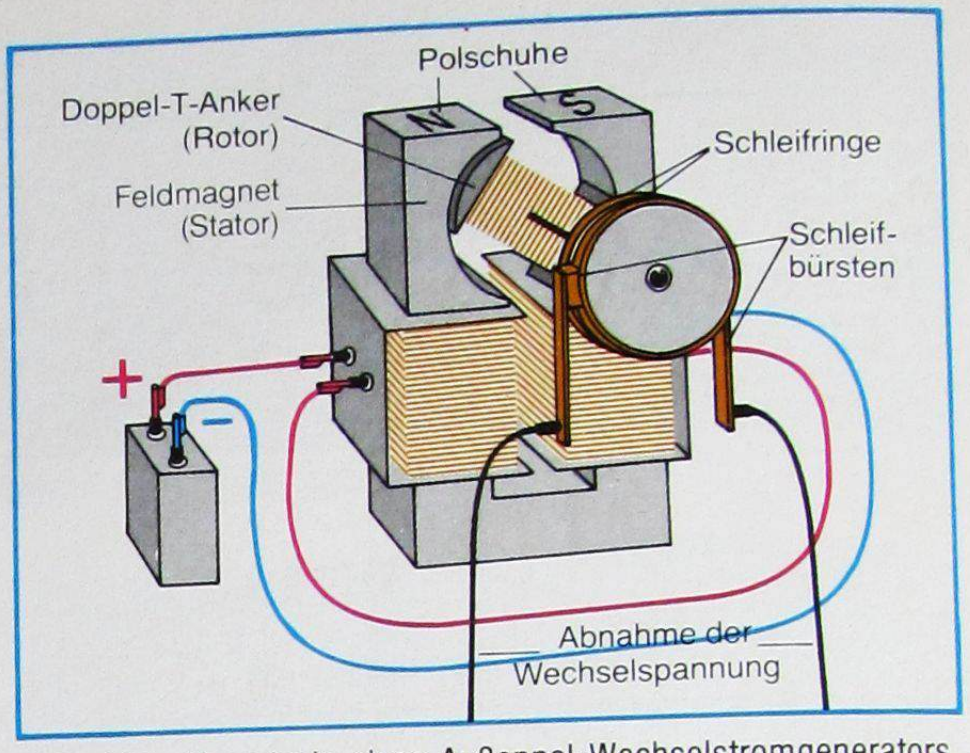


Abb. 46.1. Bauprinzip eines Außenpol-Wechselstromgenerators

Es ist auch ungünstig, große Ströme durch die Schleifbürsten abzunehmen. Diese würden wegen der dort auftretenden sehr hohen Temperaturen (Funken) verschmoren.

Innenpolgenerator *(Abb. 46.2.)*

Beim *Innenpolgenerator* ist der Magnet drehbar (Läufer) zwischen feststehenden Induktionsspulen angeordnet.

Versuch

Bei einem Aufbau nach *Abb. 46.2.* wird der Magnet zwischen den hintereinander geschalteten und mit einem Spannungsmesser verbundenen Spulen gedreht.

Beobachtung. Bei der Drehung des Magneten zwischen den Spulen zeigt der Spannungsmesser eine Wechselspannung an. In den Spulen entsteht eine Induktionsspannung, weil sich während der Rotation des Magneten die Stärke des Magnetfeldes in den Spulen zeitlich ändert. Nach jeder halben Umdrehung des Magneten kehrt sich die Richtung der Feldlinien bezüglich einer Induktionsspule um; dadurch ändert sich jeweils die

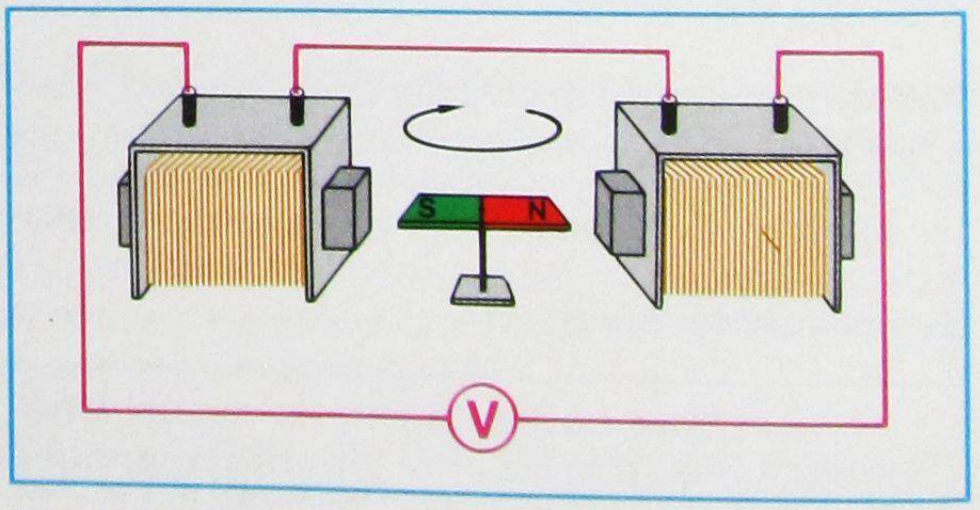


Abb. 46.2. Prinzip eines Innenpolgenerators

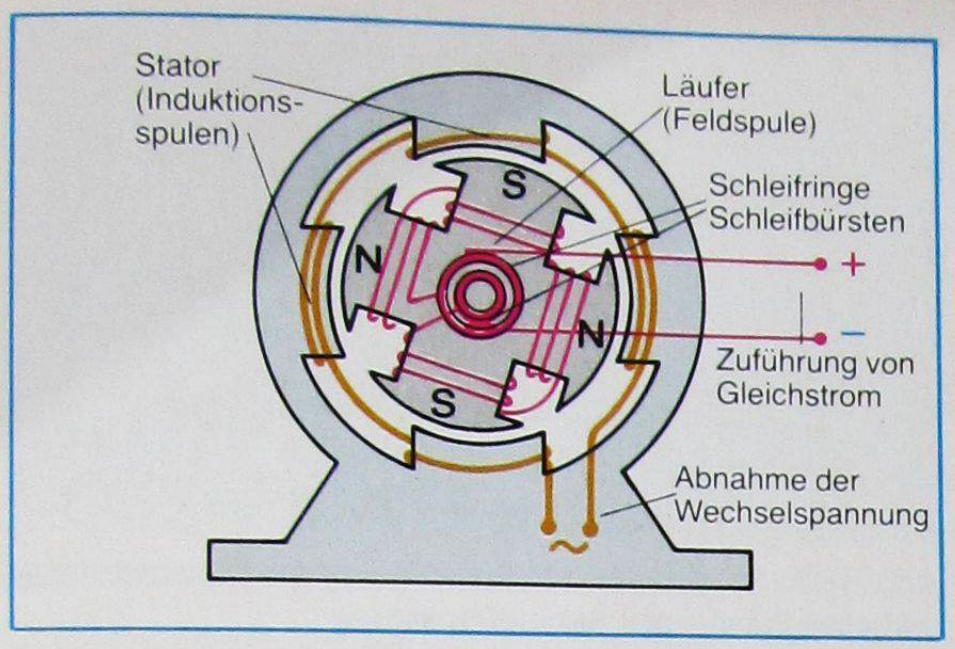


Abb. 47.1. Schnittzeichnung eines Innenpol-Wechselstromgenerators mit zwei Polpaaren

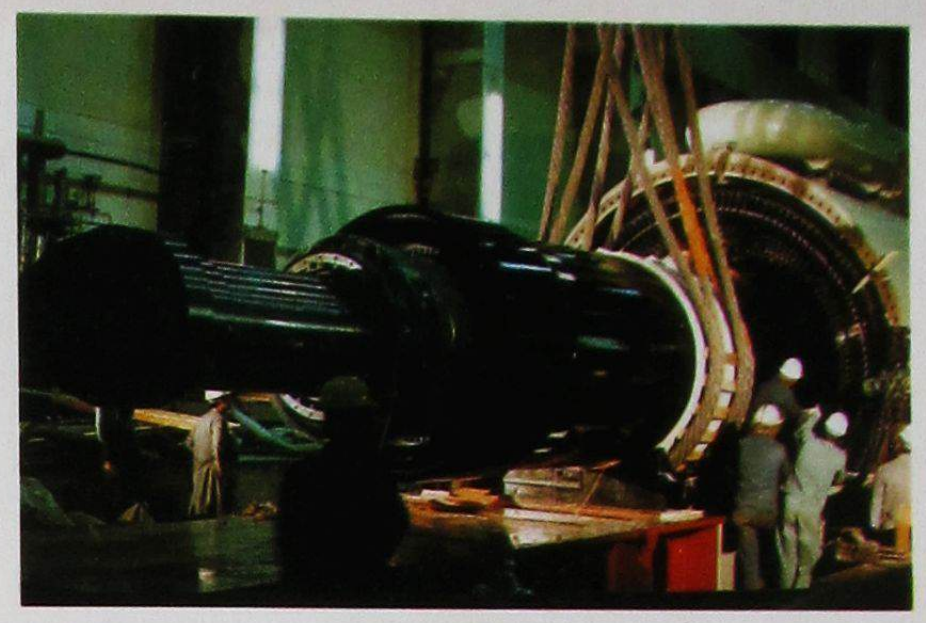


Abb. 47.2. In einem Elektrizitätswerk wird der Läufer eines Innenpolgenerators in den Stator eingesetzt.

Richtung der Induktionsspannung in der Spule. Die Weicheisenkerne in den Spulen verstärken die zeitliche Änderung des Magnetfeldes in den Spulen. Dadurch wird die erzeugte Induktionsspannung größer.

Bei einem in der Technik verwendeten Innenpolgenerator besteht der Läufer i. A. aus einem Elektromagneten mit mehreren Polen. Die Spulen sind auf dem Eisenkern so angeordnet, dass auf einen Nordpol jeweils ein Südpol folgt *(Abb. 47.1.)*. Diese Spulen (Feldspulen) werden von Gleichstrom durchflossen, der über zwei Schleifringe zugeführt wird. Den Stator bilden mehrere auf einen Eisenkern gewickelte Induktionsspulen. Da diese Spulen hintereinander geschaltet sind, addieren sich die in ihnen induzierten Spannungen zu einer Gesamtspannung.

Ein Läufer-Polpaar erzeugt bei einem Umlauf in einer Spule eine Periode der Wechselspannung, mehrere Polpaare erzeugen entsprechend mehr. Bei 10 Polpaaren braucht dann der Läufer zur Erzeugung einer Wechselspannung mit einer Frequenz f = 50 Hz in der Minute nur mehr 300 Umdrehungen auszuführen. Dadurch wird die mechanische Beanspruchung der Maschine geringer.

Der Innenpolgenerator besitzt feste Anschlüsse zur Verbindung mit dem Stromnetz. Die Abnahme einer hohen Induktionsspannung und eines großen Induktionsstromes ist daher problemlos möglich. In den Elektrizitätswerken werden nur Innenpolmaschinen verwendet *(Abb. 47.2.)*. Großgeneratoren erzeugen Wechselspannungen bis 20 kV und geben Leistungen bis 1000 MW ab.

Zusammenfassung

1. Außenpol- und Innenpolgeneratoren erzeugen Wechselspannungen.
2. Beim Außenpolgenerator dreht sich die Induktionsspule (Anker) zwischen feststehenden Magnetpolen.
3. Beim Innenpolgenerator drehen sich die Magnetpole zwischen feststehenden Induktionsspulen.

Aufgaben

1. Beschreibe einen Versuch zur Erzeugung einer Wechselspannung.
2. a) Erläutere die Entstehung einer Wechselspannung bei der Drehung einer Leiterschleife in einem Magnetfeld.
b) Zeichne das t-U-Diagramm einer Wechselspannung.
3. Welche Merkmale besitzt eine Wechselspannung?
4. a) Beschreibe anhand einer Skizze das Bauprinzip eines Außenpolgenerators.
b) Beschreibe die Funktionsweise eines Außenpolgenerators.
c) Warum können Außenpolgeneratoren nicht für große Leistungsabgaben gebaut werden?
5. Beschreibe anhand einer Skizze das Bauprinzip und die Funktionsweise eines Innenpolgenerators.
6. Worin unterscheidet sich das Bauprinzip eines Innenpolgenerators von demjenigen eines Außenpolgenerators?
7. Wodurch wird beim Innenpolgenerator
a) eine hohe Spannung,
b) eine niedrige Drehzahl
erzielt?

4.6. Transformator

Elektrische Energie, die von Generatoren erzeugt wird, muss den „Verbrauchern" i. A. über große Entfernungen zugeführt werden. Dazu werden Transformatoren[1] verwendet.

4.6.1. Bau- und Funktionsweise eines Transformators

Versuch

Auf einem Schenkel eines geblätterten U-Kerns mit einem Joch aus Eisen befindet sich eine Spule mit 500 Windungen (Primärspule), auf dem anderen Schenkel eine aus einer Litze gewickelte Spule mit 5 Windungen (Sekundärspule). Die Enden der Sekundärspule werden mit einer Glühlampe für 2,5 V verbunden. An die Primärspule wird eine Wechselspannung von 230 V gelegt *(Abb. 48.1.)*.
Beobachtung. Wird der Primärstromkreis geschlossen, so leuchtet das Lämpchen im Sekundärstromkreis, obwohl es nicht mit einer Spannungsquelle verbunden ist. Am Lämpchen muss eine Spannung von ca. 2 V anliegen, da eine wesentlich höhere Spannung das Lämpchen zerstören würde. Messungen der Spannung am Lämpchen bestätigen diese Annahme.
Die am Lämpchen anliegende Spannung muss in der Sekundärspule entstanden sein. Der Wechselstrom in der Primärspule besitzt eine Frequenz von 50 Hz, d. h., der Strom wechselt in der Sekunde 100-mal seine Richtung und erreicht jeweils Höchst- und Nullwerte (vgl. *Abb. 45.1.*). Er erzeugt dadurch ein Magnetfeld, das in jeder Sekunde 100-mal seine Richtung ändert und jeweils auf- und abgebaut wird. Dieses magnetische Wechselfeld verläuft im geschlossenen Eisenkern und durchsetzt die Sekundärspule. In dieser wird eine Wechselspannung induziert, die die gleiche Frequenz wie die Primärspannung besitzt.

[1] von *transformare* (lat.) = umwandeln

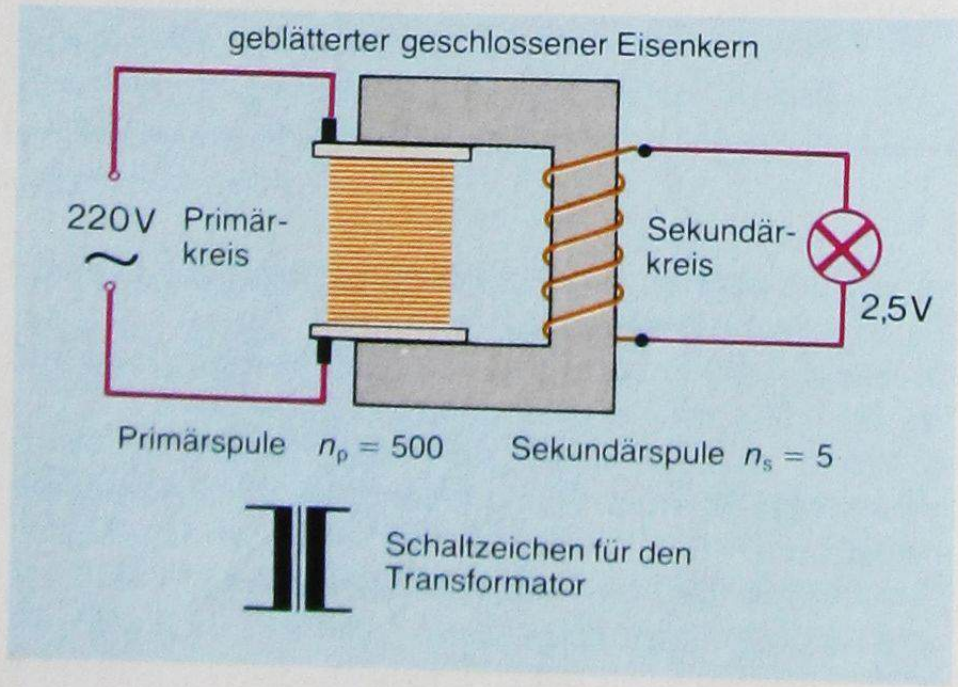


Abb. 48.1. Aufbau eines Transformators

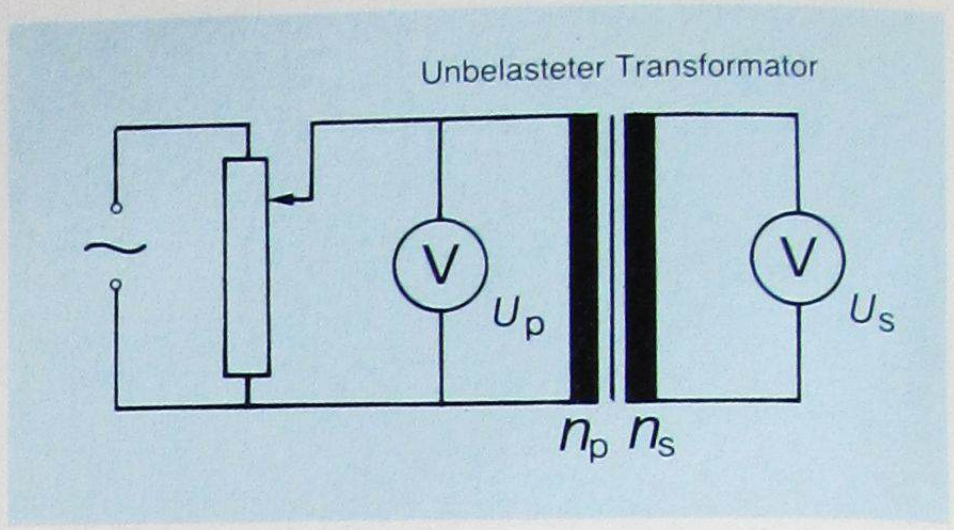


Abb. 48.2. Schaltskizze zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Primär- und Sekundärspannung

4.6.2. Transformatorgesetze

Die zwischen den Wechselspannungen, den Wechselströmen und den Windungszahlen der Spulen eines Transformators bestehenden Zusammenhänge werden untersucht.

Unbelasteter Transformator

Ein Transformator wird als unbelastet bezeichnet, wenn in der Sekundärspule kein Strom fließt.

Versuch

Wir messen die am Experimentiertransformator vorgegebene Primärspannung U_P und die zugehörige Sekundärspannung U_S *(Abb. 48.2.)*. Wir vertauschen Primär- und Sekundärspule mehrmals gegen Spulen mit anderen Windungszahlen und wiederholen die Messungen.

Messreihe				Auswertung	
n_p	n_s	U_p in V	U_s in V	$n_p : n_s$	$U_p : U_S$
500	500	20	19	1,0	1,1
500	1000	20	39	0,50	0,51
500	5000	20	195	0,10	0,10
500	10000	20	400	0,05	0,05
125	1000	20	158	0,13	0,13
250	500	20	38	0,50	0,53
250	1000	20	79	0,25	0,25
1000	500	20	9,5	2,0	2,1
1000	500	20	4,8	4,0	4,2
1000	125	20	2,2	8,0	9,1

Tab. 48.1. Messreihe

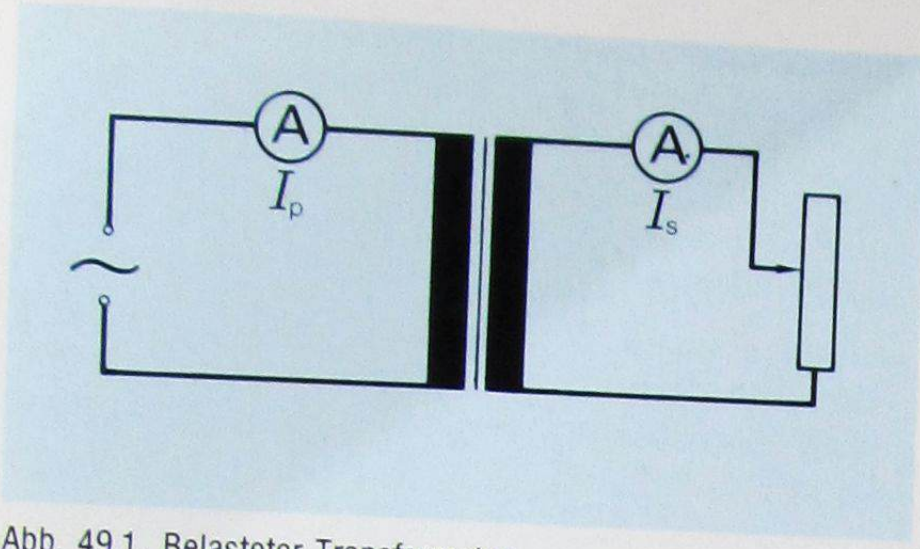


Abb. 49.1. Belasteter Transformator

Ergebnis. Das Verhältnis von Primär- und Sekundärspannung ist gleich dem Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule (vgl. Auswertung in *Tab. 48.1.*).

Da ein Spannungsmesser i. A. einen sehr großen elektrischen Widerstand besitzt, fließt im Sekundärstromkreis ein vernachlässigbar kleiner Strom. In diesem Fall betrachtet man den Transformator auch als unbelastet.

Beim unbelasteten Transformator verhalten sich die Wechselspannungen auf der Primär- und Sekundärseite wie die Windungszahlen der Primär- und Sekundärspule.

$$\frac{U_P}{U_S} = \frac{n_P}{n_S}$$

Das Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule $n_P : n_S$ bezeichnet man als *Übersetzungsverhältnis des Transformators.*

Beim unbelasteten Transformator fließt im Primärkreis ein kleiner sog. *Leerlaufstrom*, der die Magnetisierung des Eisenkerns bewirkt.

Belasteter Transformator

Die Primärspule des Transformators liegt an einer Wechselspannungsquelle. Wird an die Sekundärspule ein Verbraucher (ohmscher Widerstand) angeschlossen, so fließt im Sekundärkreis ein Strom; der Transformator ist dann belastet. Die Belastung des Transformators ist umso größer, je mehr Strom im Sekundärkreis fließt.

Die Beziehung zwischen Primär- und Sekundärstrom und den Windungszahlen der Spulen wird beim belasteten Transformator untersucht.

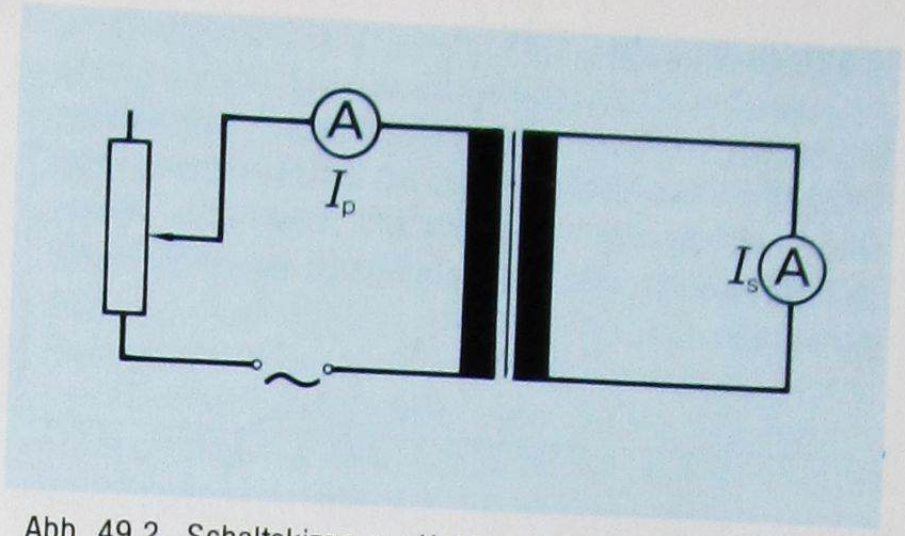


Abb. 49.2. Schaltskizze zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Primär- und Sekundärstrom

Versuche

1. Die Belastung eines Transformators mit den Windungszahlen $n_P = 500$, $n_s = 250$ wird mit Hilfe eines Regelwiderstandes mehrmals vergrößert. Dabei werden jeweils der Primärstrom I_P und der Sekundärstrom I_S gemessen *(Abb. 49.1.)*.
2. Nun wird einige Male das Verhältnis der Windungszahlen der Spulen sowie der Strom im Primärkreis geändert. Hierbei werden jeweils der Primärstrom I_P und der zugehörige Sekundärstrom I_S bei kurzgeschlossener Sekundärspule gemessen *(Abb. 49.2.)*.

Die Versuche ergeben, dass bei größer werdendem Strom im Sekundärkreis auch der Strom im Primärkreis ansteigt. Die Größe des Primärstromes hängt dabei von der Größe des Sekundärstromes und vom Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule ab *(Tab. 49.1.)*. Je stärker der Transformator belastet ist, d. h., je größer der Strom im Sekundärkreis ist, desto besser ist die Beziehung $I_P : I_S = n_S : n_P$ erfüllt (vgl. die Auswertung in *Tab. 49.1.*). Das Gesetz ist also nur dann gültig, wenn der Transformator „hinreichend" belastet ist.

Messreihe				Auswertung	
n_p	n_s	I_p in A	I_s in A	$n_s : n_p$	$I_p : I_s$
500	250	0,14	0,20	0,50	0,70
500	250	0,18	0,30	0,50	0,60
500	250	0,22	0,40	0,50	0,55
500	250	0,42	0,80	0,50	0,53
500	250	1,1	2,2	0,50	0,50
500	250	0,40	0,79	0,50	0,51
500	125	0,40	1,5	0,25	0,25
1000	125	0,40	3,1	0,13	0,13
500	1000	0,60	0,28	2,0	2,1
500	10000	0,73	0,033	20	22

Tab. 49.1. Messreihe

Angenähert gilt:

Beim belasteten Transformator verhalten sich die Wechselströme im Primärkreis und Sekundärkreis umgekehrt wie die Windungszahlen der Primärspule und Sekundärspule.

$$\frac{I_P}{I_S} \approx \frac{n_S}{n_P}$$

Nach dem Energieerhaltungssatz muss bei einem verlustfrei arbeitenden Transformator die Leistung auf der Primärseite gleich der Leistung auf der Sekundärseite sein.

Beim verlustfreien Transformator ist die auf der Sekundärseite abgegebene Leistung gleich der auf der Primärseite aufgenommenen Leistung.

$$P_P = P_S,\ U_P \cdot I_P = U_S \cdot I_S$$

Technische Transformatoren arbeiten jedoch nicht ohne *Energieverluste.* Die Spulendrähte erwärmen sich beim Stromfluss. Daneben erwärmt sich auch der Eisenkern beim ständigen Ummagnetisieren. Nicht alle Feldlinien der vom Primär- und Sekundärstrom erzeugten Magnetfelder durchsetzen jeweils die entsprechende Spule (sog. *magnetisches Streufeld*).

Diese Verluste sind jedoch gering; der Wirkungsgrad technischer Transformatoren beträgt in der Regel zwischen 95 % und 99 %. Durch besondere Bauweisen und Materialien versucht man, die Verluste besonders klein zu halten: So werden vor allem Großtransformatoren zur Reduzierung der Wärmeentwicklung durch Öl gekühlt. Um die Verluste beim Ummagnetisieren klein zu halten, verwendet man besondere Legierungen.

Die Verluste durch das magnetische Streufeld werden durch Verwendung von sogenannten *Manteltransformatoren (Abb. 50.1.)* gering gehalten.

Für den verlust- und streufeldfreien (idealen) Transformator gelten folgende Gesetze:

$$\frac{U_P}{U_S} = \frac{n_P}{n_S}$$

$$\frac{I_P}{I_S} \approx \frac{n_S}{n_P}$$

$$P_P = P_S$$

Mit Hilfe von Transformatoren können Wechselspannungen hinauf- oder heruntertransformiert und Wechselströme entsprechend herunter- oder hinauftransformiert werden.

4.6.3. Niederspannungstransformatoren

Bei Niederspannungstransformatoren wird die Primärspule an die Netzspannung von 230 V angeschlossen. An der Sekundärseite kann i. A. eine Spannung bis 24 V abgenommen werden. Besitzt die Sekundärspule Wahlbuchsen *(Abb. 50.2.)*, so können bestimmte Teilspannungen abgegriffen werden.

Bei Transformatoren zum Betrieb einer elektrischen Spielzeugeisenbahn oder dgl. lässt sich die Sekundärspannung praktisch stufenlos regeln. Dazu wird ein Schleifkontakt, der auf der i. A. kreisförmig angeordneten Sekundärspule gleitet, mit

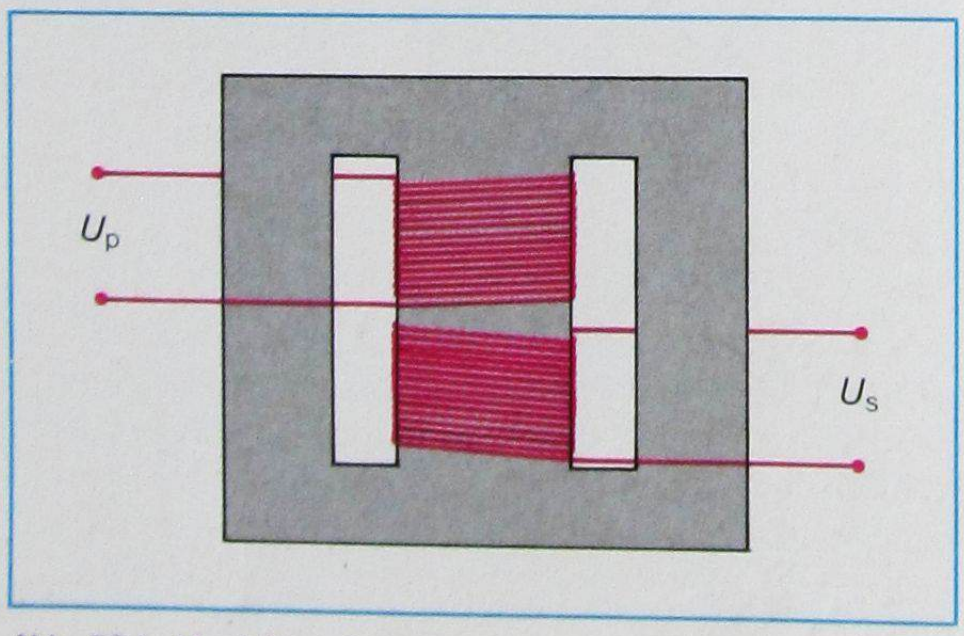


Abb. 50.1. Manteltransformator

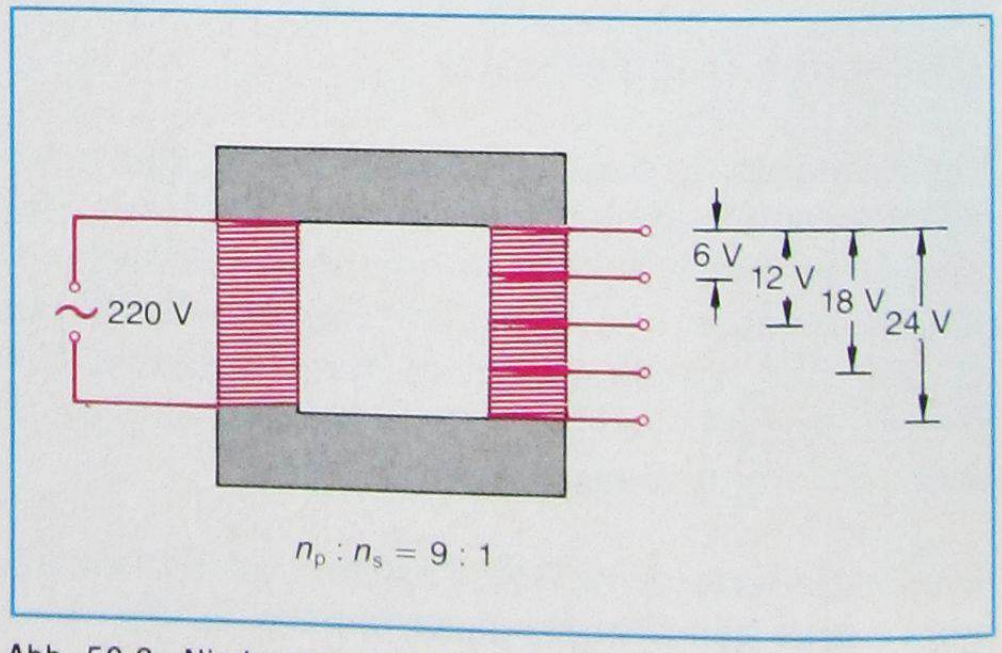


Abb. 50.2. Niederspannungstransformator mit Wahlbuchsen

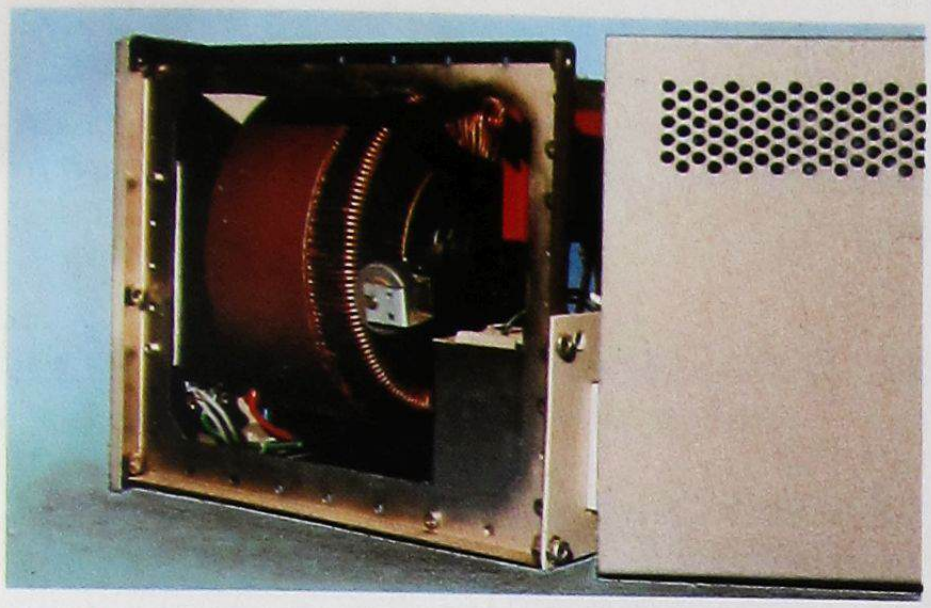


Abb. 51.1. Regeltransformator für Niederspannungen

einem Drehschalter betätigt. Je größer die vom Schleifer abgegriffene Windungszahl der Sekundärspule ist, desto größer ist die abgenommene Spannung. Die im Physikunterricht verwendeten Netzgeräte für Niederspannungen enthalten solche Regeltransformatoren *(Abb. 51.1.)*.

4.6.4. Hochspannungstransformatoren

Je größer das Verhältnis der Windungszahlen von Sekundärspule und Primärspule ($n_P : n_S$) ist, desto höher ist die Sekundärspannung im Vergleich zur Primärspannung.

Versuch **Vorsicht Lebensgefahr!**

Die Primärspule eines Transformators hat 500 Windungen, die Sekundärspule 23 000 Windungen. An die Buchsen der Sekundärspule werden sog. *Hörnerelektroden* angeschlossen *(Abb. 51.2.)*. Die Primärspule liegt an der Netzspannung 230 V.
Beobachtung. Zwischen den Elektroden ist ein Lichtbogen zu beobachten, der nach oben klettert und schließlich abreißt. Die Sekundärspannung ist so hoch, dass eine elektrische Entladung zwischen den Elektroden in Form eines Lichtbogens stattfindet.

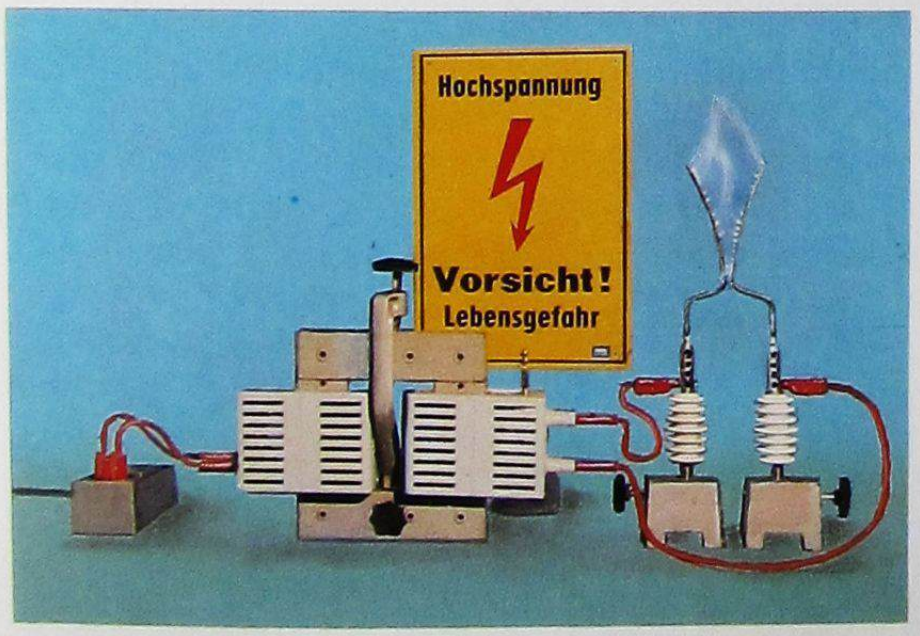


Abb. 51.2. Hochspannungstransformator mit Lichtbogen – Vorsicht! Lebensgefahr!

Hochspannung wird z. B. benötigt zur Beschleunigung von Elektronen in Fernsehröhren und Röntgenröhren, zur Überprüfung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit von Isolierstoffen, zur Funkenbildung bei Zündkerzen in Kfz-Motoren und vor allem bei der Übertragung von elektrischer Energie auf große Entfernungen.

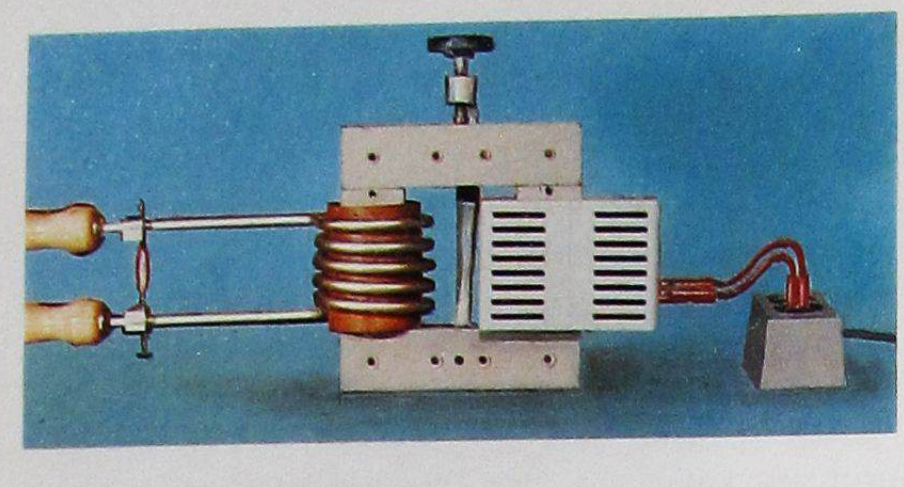
4.6.5. Hochstromtransformatoren

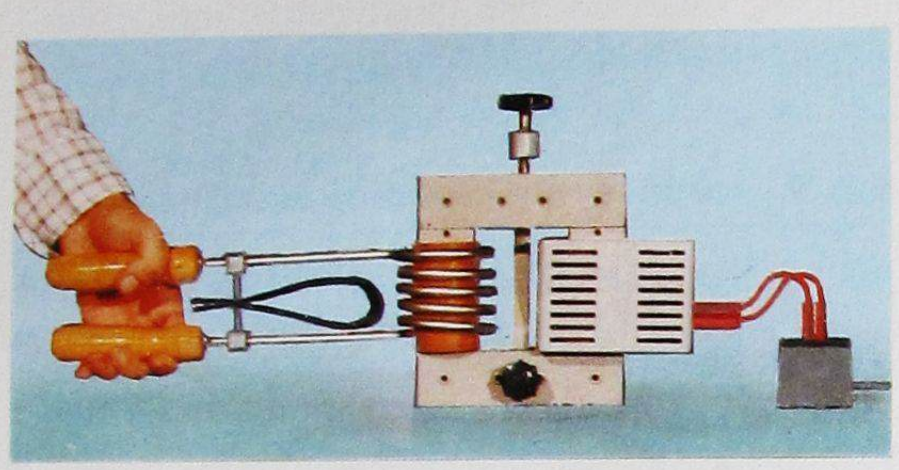
Bei *Hochstromtransformatoren* hat die Sekundärspule im Vergleich zur Primärspule nur wenige Windungen aus einem dicken Draht.

Versuche

1. Es wird ein Transformator aus einer Primärspule mit 500 Windungen und einer Sekundärspule mit 5 Windungen zusammengestellt. Die Sekundärspule wird
a) mit einem Eisennagel,
b) mit den Elektroden einer Schweißzange, zwischen denen zwei Eisenbleche zusammengepresst sind, kurzgeschlossen.

2. Die Primärspule des Transformators hat 500 Windungen, die Sekundärseite bildet eine Kreisrinne mit Lötzinn.
Bei beiden Versuchen wird die Primärspule des Transformators an die Netzspannung 230 V angeschlossen.
Beobachtung. Zu **1.** Der Eisennagel glüht nach kurzer Zeit *(Abb. 52.1.a.)* und schmilzt schließlich durch. Die beiden Eisenbleche werden zwischen den Elektroden der Zange zusammengeschweißt *(Abb. 52.1.b.)*. Das Lötzinn in der Rinne schmilzt *(Abb. 52.1.c.)*.
Zu **2.** Im Sekundärkreis fließen jeweils große Ströme, weil dessen elektrischer Widerstand sehr klein ist (geringe Länge, große Querschnittsfläche der Leiter). Die Schmelzrinne und das Lötzinn werden dabei so heiß, dass das Lötzinn schmilzt. Der Nagel und die Schweißstellen an den beiden Blechen besitzen einen größeren Widerstand (Übergangswiderstand) als der Spulendraht der Sekundärspule. Sie erwärmen sich daher sehr stark und schmelzen schließlich. An den Schweißstellen der Bleche fließt das Metall ineinander, nach dem Abkühlen ist hier eine feste Verbindung entstanden.





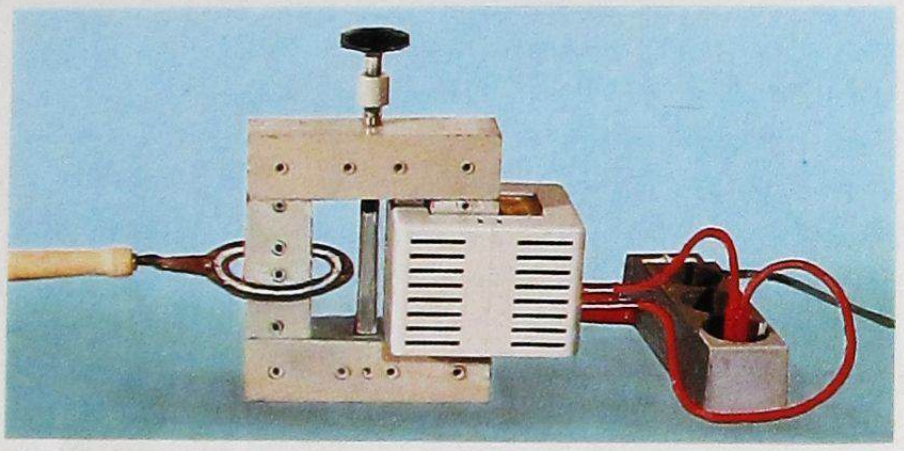


Abb. 51.1. Hochstromtransformator
a) Der Nagel glüht und schmilzt.
b) Die Eisenbleche werden zusammengeschweißt.
c) Das Zinn in der Rinne schmilzt.

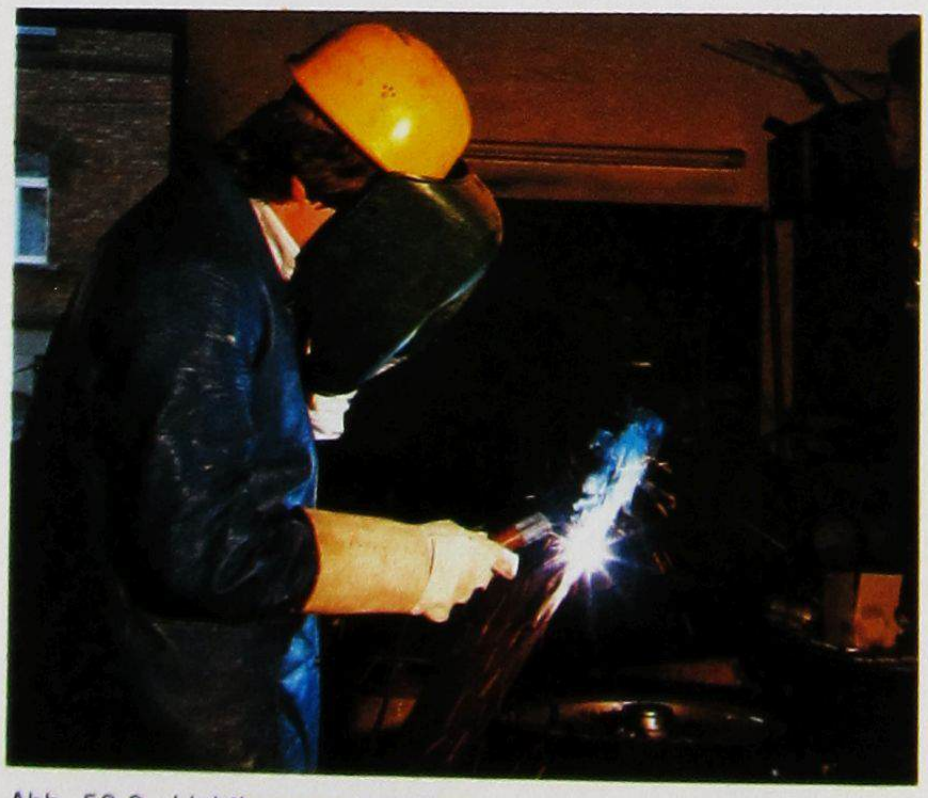


Abb. 52.2. Lichtbogenschweißen

Hochstromtransformatoren werden in der Technik z. B. beim *Lichtbogenschweißen (Abb. 52.2.)*, beim *Punktschweißen* und beim *elektrischen Schmelzen* von Metallen in Schmelzöfen verwendet.

4.6.6. Übertragung elektrischer Energie auf große Entfernungen

Industrie-, Gewerbe-, Verkehrsbetriebe, Haushalte usw. haben einen großen Bedarf an elektrischer Energie. Sie wird i. A. über große Entfernungen von den Elektrizitätswerken zu den Verbrauchern geleitet.

Elektrische Maschinen und Geräte sind durch eine bestimmte elektrische Leistungsaufnahme gekennzeichnet. Beim gleichzeitigen Betrieb dieser „Verbraucher" ist die gesamte Leistungsaufnahme ($P = U \cdot I$ oder $P = I^2 \cdot R$) sehr groß. Die Elektrizitätswerke sorgen dafür, dass in ihren jeweiligen Versorgungsgebieten die elektrische Leistung, die benötigt wird, zur Verfügung steht.

Würden Überlandleitungen für eine Spannung von 230 V (sog. 230-V-Leitungen) von den Elektrizitätswerken zu den Verbrauchern führen, müsste der Strom in diesen Leitungen sehr groß sein, damit der vorgegebene Bedarf an elektrischer Leistung gedeckt werden könnte. Dabei würden sich die Verluste bei der Übertragung der Energie nur dann in wirtschaftlich tragbaren Grenzen halten (höchstens 10 %), wenn die Querschnittsflächen der Kupferdrähte riesig groß wären, also ihr Widerstand sehr klein wäre. Energieverluste entstehen nämlich durch Erwärmung der Drähte beim Stromfluss.

Beispiel

Ein Verbrauchergebiet mit einem Leistungsbedarf von 10 MW liegt 50 km (Hin- und Rückleitung 100 km) vom Elektrizitätswerk entfernt. Sollte diese Leistung mit der 230-V-Kupferleitung zugeführt werden, müsste in der Leitung der Strom

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10\,000\,000\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 43\,478\ \text{A} \approx 43\ \text{kA}$$

fließen.

Die Leitung dürfte bei einem Leistungsverlust von 10 % (P = 1 MW) den Widerstand

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{1\,000\,000\ \text{W}}{(43\,478\ \text{A})^2} = 0{,}00053\ \Omega$$ haben.

Dieser Widerstand würde einen Spannungsabfall $U = R \cdot I = 23$ V bewirken. Es ergäbe sich ein Leiterquerschnitt von

$$A = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0{,}017\ \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot 100\ \text{km}}{0{,}00053\ \Omega \cdot \text{m}} \approx 3{,}2\ \text{m}^2$$

Die Kupferleitung müsste einen Durchmesser d = 1,02 m haben.

Das Beispiel zeigt, dass es sinnlos wäre, die elektrische Energie auf diese Weise zu übertragen.

Wird die Wechselspannung jedoch im Elektrizitätswerk z. B. auf 60 kV hochtransformiert, so fließt bei gleichem Leistungsbedarf von 10 MW nur mehr ein Strom von rund 170 A in der Leitung. Der elektrische Widerstand der Leitung darf dann – bei einem maximalen Leistungsverlust von 1 MW in der Leitung – rund 36 Ω betragen. Die Querschnittsfläche des Leiters misst nur mehr rund 0,5 cm^2. Der Leiterdurchmesser ist mit rund 0,8 cm realistisch und wirtschaftlich vertretbar. Der Leistungsverlust beim Betrieb des Transformators ist hierbei unberücksichtigt geblieben.

Die elektrische Energie kann auf große Entfernungen übertragen werden, wenn für die Übertragung hohe Spannungen benützt werden; die Ströme können dann verhältnismäßig klein sein. Im Verbrauchergebiet muss die Spannung wieder auf verbrauchergerechte 230 V heruntertransformiert werden.

In einem Experiment soll die Übertragung der elektrischen Energie demonstriert werden.

Versuche

1. Eine Glühbirne (3,5 V, 0,20 W) und ein Widerstand (1000 Ω) sind hintereinander an eine 3,5-V-Wechselspannungsquelle geschaltet *(Abb. 53.1.)*.
2. Bei der Schaltung nach *Abb. 53.2.* liegt die Primärseite eines Transformators ($n_P : n_S = 1 : 20$) an einer Wechselspannungsquelle mit 3,5 V; beim zweiten Transformator ($n_P : n_S = 20 : 1$) ist an die Sekundärspule die Glühlampe (3,5 V, 0,20 W) angeschlossen. Der Strom in der Leitung zwischen den beiden Transformatoren wird gemessen. Der Widerstand (1000 Ω) zwischen beiden Trafos stellt – wie auch im Versuch 1. – den Widerstand einer etwa 30 km langen Kupferleitung (Fernleitung) mit einer Querschnittsfläche von 0,5 mm^2 dar.
Beobachtung. Zu **1.** Im 1. Versuch leuchtet die Glühlampe nicht. Die gewünschte Leistung (0,20 W) kann nicht übertragen werden.

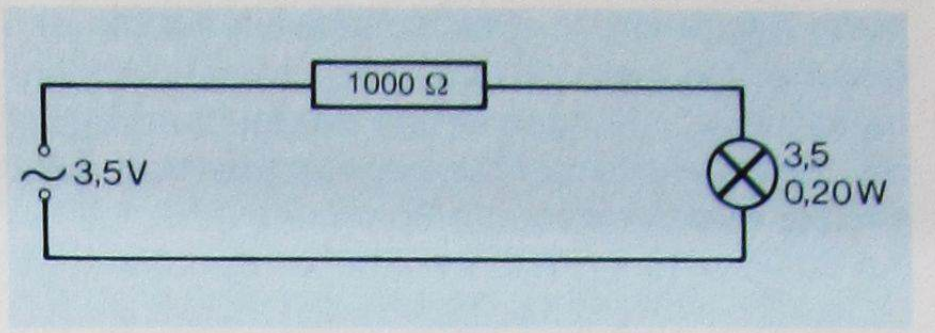


Abb. 53.1. Wegen des großen Leistungsverlustes am Widerstand leuchtet das Lämpchen nicht.

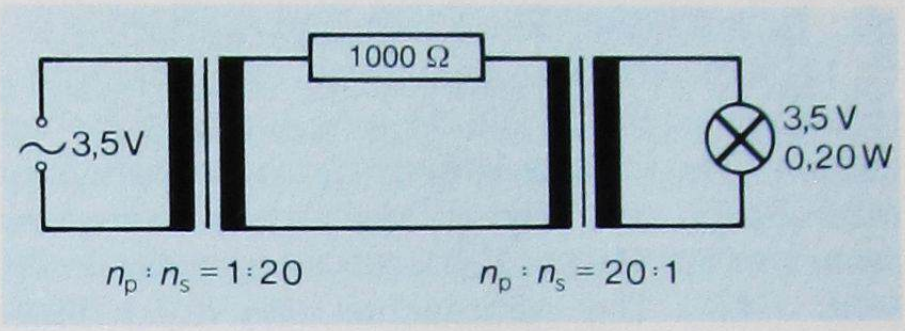


Abb. 53.2. Mit Hilfe von Transformatoren lassen sich bei der Übertragung von Energie große Leistungsverluste vermeiden.

Der Grund dafür ist: Am Widerstand (1000 Ω) fällt der überwiegende Teil der Gesamtspannung 3,5 V ab. Der Betriebswiderstand des Lämpchens beträgt ja nur $\frac{(3{,}5\ \text{V})^2}{0{,}20\ \text{W}} = 61\ \Omega$.

Zu **2.** Wird im 2. Versuch die Wechselspannung mit dem ersten Transformator von 3,5 V auf 70 V hochtransformiert und mit dem zweiten Transformator wieder auf die Verbraucherspannung heruntertransformiert, so leuchtet das Lämpchen. Der Strom in der 70-V-Leitung beträgt – wie auch der Strommesser angenähert anzeigt – ungefähr den 20. Teil des Strombedarfs der Glühlampe von 0,057 A, also 0,0029 A.

Allgemein verursacht der Widerstand R der Leitung einen Leitungsverlust $P = I^2 \cdot R$, wenn durch die Leitung der Strom I fließt. In unserem Fall ist der Leistungsverlust in dieser Leitung

$$P = (0{,}0029\ \text{A})^2 \cdot 1000\ \Omega = 0{,}008\ \text{W}$$

bzw. der Spannungsabfall längs der Leitung

$$U = 1000\ \Omega \cdot 0{,}0029\ \text{A} = 2{,}9\ \text{V}$$

ist verhältnismäßig gering (4 %). Die geringen Verluste beim Betrieb der Transformatoren können vernachlässigt werden.

Die dem Lämpchen zugeführte Leistung (0,19 W) und die vorgesehene Leistungsaufnahme (0,20 W) unterscheiden sich nur wenig. Das Lämpchen leuchtet praktisch mit normaler Helligkeit.

In der Praxis wird im *Elektrizitätswerk* die von den Generatoren erzeugte Wechselspannung hochtransformiert. Je nach Größe der zu übertragenden Energie und der Länge der Übertragungsstrecke wird die erzeugte Spannung (z. B. 5,5 kV) auf 60 kV, 110 kV, 220 kV, 380 kV transformiert.

Die *Hochspannungsfernleitung* führt zum *Hauptumspannwerk*; dort wird z. B. die Spannung 220 kV auf eine Spannung von 60 kV heruntertransformiert. Von hier aus führen 60-kV-Leitungen zu mehreren *Bezirksumspannwerken (Abb. 54.1.)*, in denen die Spannung auf 15 kV heruntertransformiert wird. Die 15-kV-Leitungen gehen zu den *Orts-Trafohäuschen (Umspannstationen) (Abb. 54.2.)*; dort wird auf die Verbraucherspannung von 380 V bzw. 230 V heruntertransformiert *(Abb. 54.2.)*. Die Verbraucher sind durch Freileitungen oder Erdkabel mit dem Ortstrafo verbunden.

Die Versorgungsnetze der einzelnen Elektrizitätswerke sind in einem Verbundsystem zusammengeschlossen. Dieses hat den Vorteil, dass auch bei großen Spitzenbelastungen in bestimmten Gebieten oder bei Ausfall eines Kraftwerkes oder eines Leitungsnetzes die Versorgung aller Abnehmer mit der notwendigen elektrischen Energie sichergestellt ist. In sog. *Lastverteilerstellen* werden die hierzu erforderlichen Schaltungen veranlasst. Unserem Verbundnetz gehören auch Großkraftwerke benachbarter Länder an.

Die Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen ist bei wirtschaftlich tragbaren Energieverlusten nur mit hohen Spannungen und entsprechend kleinen Strömen möglich. Hierzu eignet sich nur Wechselspannung, da nur sie sich transformieren lässt.

Abb. 54.1. Umspannwerk

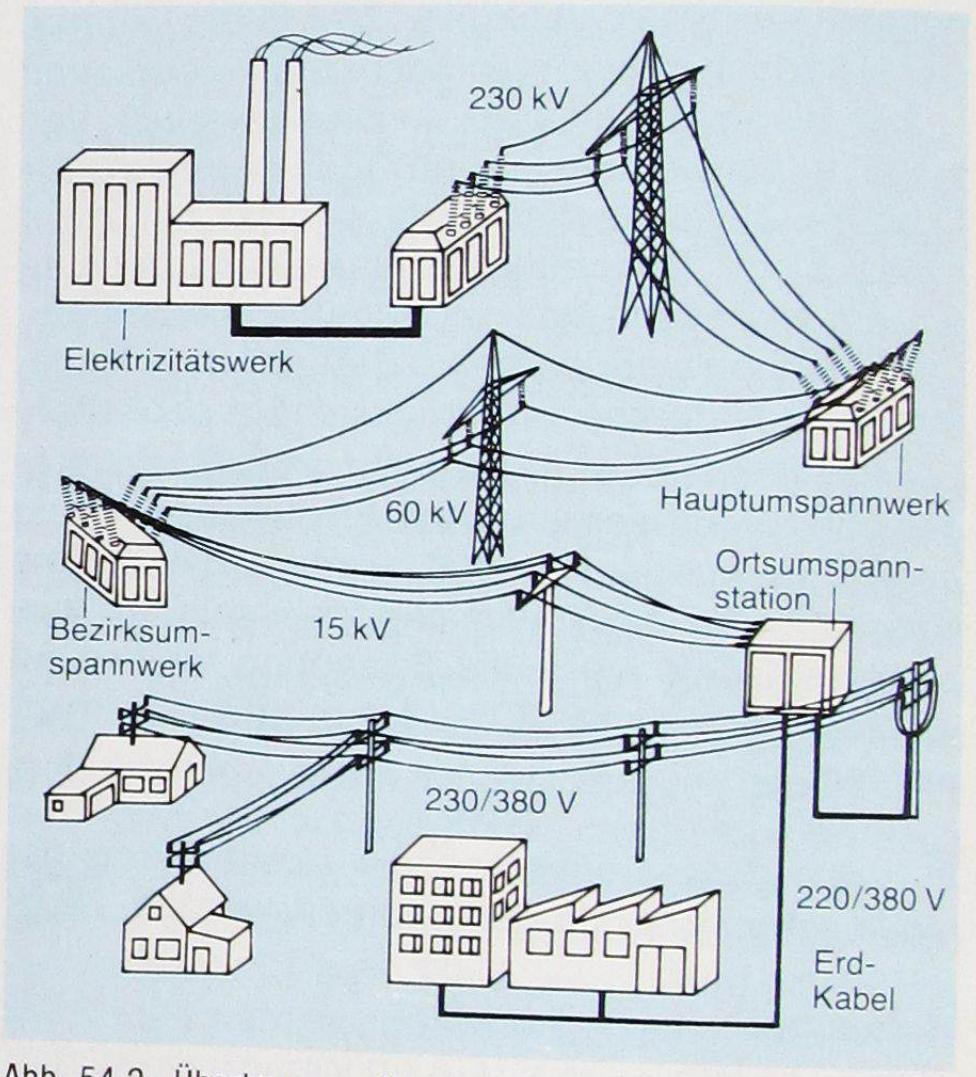


Abb. 54.2. Übertragung elektrischer Energie

Zusammenfassung

1. Beim unbelasteten Transformator verhalten sich die Wechselspannungen auf der Primär- und Sekundärseite wie die Windungszahlen der Primär- und Sekundärspule.
2. Beim belasteten Transformator verhalten sich die Wechselströme im Primärkreis und Sekundärkreis angenähert wie die Windungszahlen der Primärspule und Sekundärspule.
3. Für den verlustfreien Transformator gilt das Gesetz: $P_P = P_S$ oder $U_P \cdot I_P = U_S \cdot I_S$
4. Transformatoren haben Wirkungsgrade zwischen 95 % und 99 %.
5. Transformatoren finden Verwendung als Niederspannungs-, als Hochspannungs- und als Hochstromtransformatoren. In der Energieübertragung werden sie eingesetzt, um die Verluste gering zu halten. Die Spannung wird dabei zunächst hochtransformiert, um die Stromstärke und damit den Leistungsverlust gering zu halten, und anschließend wieder auf verbrauchergerechte Spannungen heruntertransformiert.

Aufgaben

1. a) Beschreibe anhand einer Skizze den Aufbau eines Transformators.
b) Beschreibe die Funktionsweise des Transformators.
2. Begründe, warum sich Gleichspannung nicht transformieren lässt.
3. a) Beschreibe die Versuche zur Herleitung der Transformatorgesetze.
b) Gib die Gesetze an.
4. Nenne und erkläre Beispiele für die technische Anwendung von Transformatoren.
5. Erläutere die Bedeutung des Transformators für die elektrische Energieübertragung.
6. Die Primärspule eines unbelasteten Transformators hat 500 Windungen. Sie ist an das 230-V-Netz angeschlossen. Berechne die Spannungen an den Enden des Sekundärspule, wenn diese 5, 25, 500, 1000, 10 000 Windungen hat.
7. Ein Transformator mit den Windungszahlen n_P = 1000, n_S = 50 wird an das 230-V-Netz angeschlossen. Durch einen Verbraucher im Sekundärkreis fließt ein Strom von 10 A.
a) Welches Übersetzungsverhältnis hat der Trafo?
b) Welche Spannung liegt am Verbraucher an?
c) Welcher Strom fließt im Primärkreis?
(Der Trafo ist als ideal und stark belastet zu betrachten).
8. Die Ausgangsspannung bei stufenlos regelbaren Transformatoren für elektrische Spielzeuge ist auf 24 V begrenzt. Erkläre die Abnahmemöglichkeit einer beliebigen Spannung zwischen 0 V und 24 V.
9. Beim elektrischen Schweißen wird z. B. auf der Sekundärseite eines Trafos bei einer Spannung von 20 V ein Strom von 400 A benötigt. Welcher Strom fließt im Primärkreis des Transformators, wenn dieser an das 230-V-Netz angeschlossen ist und als ideal betrachtet wird?

Aus der Geschichte der Physik: Die Begründung der Elektrotechnik

Der elektrische Strom, mit dem seit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts Experimente durchgeführt wurden, war Gleichstrom. In der Arbeit mit elektrischen Generatoren sowie in der Übertragung von Energie ist jedoch Wechselstrom viel sinnvoller einzusetzen. Zunächst schien jedoch Wechselstrom nicht so nützlich wie Gleichstrom zu sein. Sogar der große amerikanische Erfinder THOMAS ALVA EDISON (1847 bis 1931), der z. B. den Börsentelegraphen und die elektrische Glühlampe erfand und als einer der größten Erfinder aller Zeiten gilt, setzte sich für die Verwendung des Gleichstroms ein und lehnte den Wechselstrom ab, sehr zu Unrecht, wie sich im Verlauf der Geschichte noch herausstellen sollte.

Dennoch beschäftigten sich die Ingenieure, Techniker und Physiker weiter mit dem Wechselstrom. Der kroatische Elektroingenieur NIKOLA TESLA (1856 bis 1943) konstruierte im Jahr 1883 einen *Induktionsmotor*, der mit Wechselstrom betrieben wurde. Im Jahr 1893 gelange es CHARLES PROTEUS STEINMETZ (1865 bis 1923), einem amerikanischen Elektroingenieur deutscher Abstammung, den *Wechselstromkreis* zu berechnen. Mit Hilfe dieser Berechnungen konnte man immer bessere Wechselstromgeräte herstellen. Damit löste der Wechselstrom endgültig den Gleichstrom im täglichen Gebrauch ab.

Weitere Meilensteine in der Entwicklung der Elektrotechnik sind mit dem Namen der deutschen Industriellen WERNER VON SIEMENS (1816 bis 1892), der auch als ihr Begründer anzusehen ist, verbunden. Im Jahr 1846 konstruierte er den *elektrischen Zeigertelegraphen* mit Selbstunterbrechung. Er stellte als erster nahtlos mit Guttapercha umwickelte Leitungen her und erfand viele *elektrische Messinstrumente.* Seine wohl größte Entdeckung war aber das „dynamoelektrische Prinzip", wie er es selber nannte. Im selbsterregenden Generator verwendet er den Restmagnetismus in einem Eisenkern, um damit eine Induktionsspannung zu erzeugen. Der Restmagnetismus im Eisenkern des Feldmagneten reicht aus, um im drehenden Anker eine geringe Spannung zu induzieren. Der dadurch erzeugte Induktionsstrom fließt auch durch die Feldspule und verstärkt damit das Magnetfeld. Dadurch wird auch die Induktionsspannung größer. Diese gegenseitige Verstärkung von Induktionsspannung bzw. Induktionsstrom und Magnetfeld setzt sich fort, bis ein Maximalwert erreicht ist.

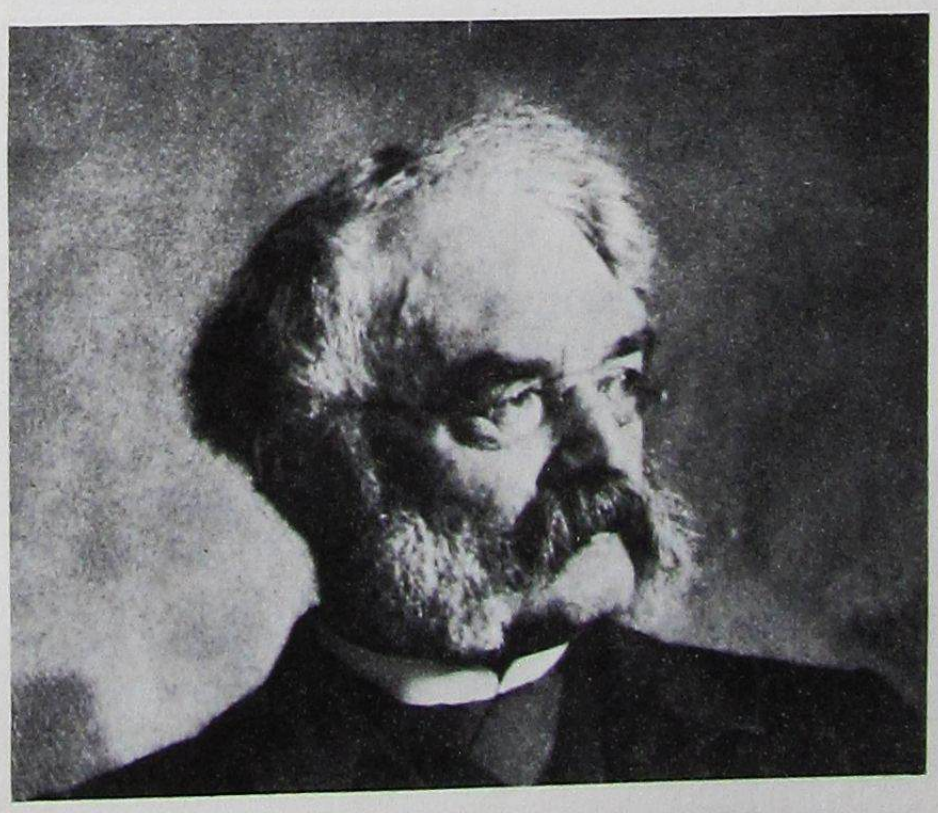


Abb. 55.1. WERNER VON SIEMENS

5. Elektrizitätsleitung in Gasen

5.1. Gase als Isolatoren

Versuch

Zwei isolierte, etwa 2 cm voneinander entfernte Metallkugeln werden in Reihe mit einem empfindlichen Strommessgerät an eine Hochspannungsquelle angeschlossen. Die elektrische Spannung wird schrittweise bis 7 kV hochgeregelt *(Abb. 56.1.)*.

Beobachtung. Das Strommessgerät zeigt auch bei einer Spannung von 7 kV zwischen den beiden Metallkugeln keinen elektrischen Strom an.

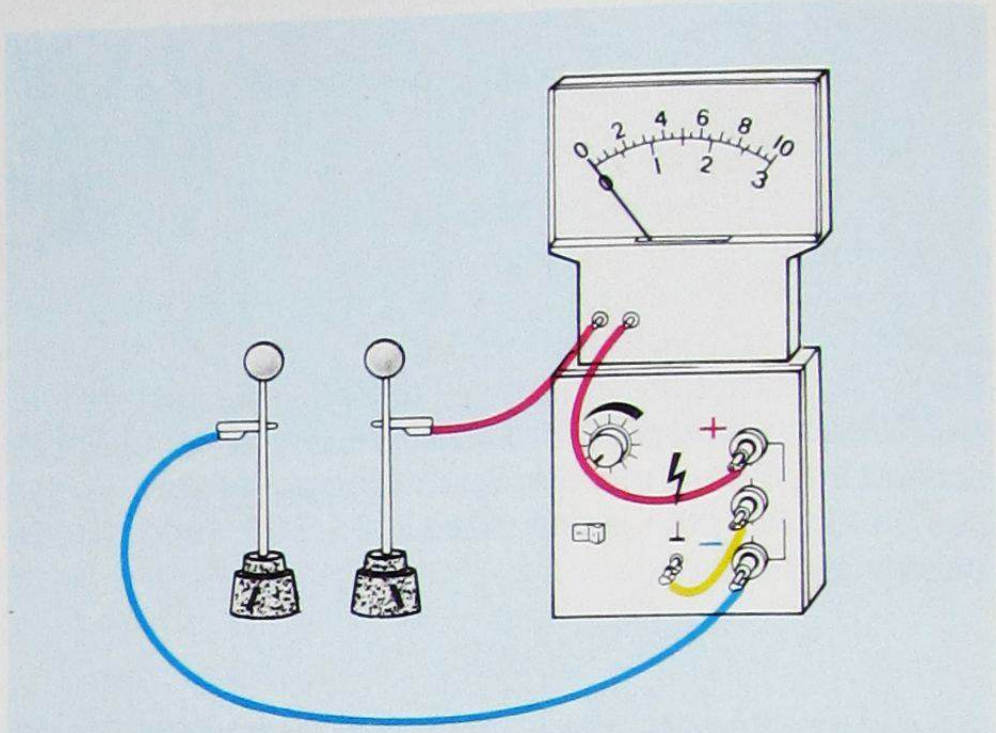


Abb. 56.1. Versuch zur Leitfähigkeit von Gasen

Bei der Einteilung in Leiter und Nichtleiter wurde deshalb bereits mitgeteilt, dass Gase im Normalzustand, d. h. bei dem in unserer Umgebung i. A. herrschenden Luftdruck und bei den üblichen Lufttemperaturen, Isolatoren sind.

5.2. Gase als sehr schlechte Leiter – spontane Ionisation

Aus dem vorhergehenden Versuchsergebnis darf jedoch noch nicht gefolgert werden, dass Luft im Normalzustand überhaupt keine frei beweglichen Ladungsträger enthält. Ihre Anzahl könnte so gering sein, dass unser Strommessgerät auf ihre Driftbewegung, die wir als elektrischen Strom bezeichnen, nicht anspricht.

Tatsächlich kann mit sehr empfindlichen Strommessern (Messbereich: $1 \cdot 10^{-9}$ A) nachgewiesen werden, dass in Gasen auch im Normalzustand ein Stromfluss möglich ist, d. h., dass in ihnen bewegliche Ladungsträger vorhanden sind. Erzeugt werden diese Ladungsträger durch Einwirkung *kosmischer Strahlung* aus dem Weltall auf neutrale Gasteilchen.

Die gleichen Änderungen an neutralen Gasteilchen bewirken auch die *Ultraviolettstrahlung* des Sonnenlichts und (hauptsächlich) die Strahlung der überall in winzigen Mengen vorhandenen *radioaktiven Stoffe.* Diese Strahlungsarten können die meisten Stoffe, also auch die Wände abgeschlossener Gefäße, durchdringen.
Bei der Einwirkung der Strahlung auf ein neutrales Gas-Molekül oder auf ein Gas-Atom können aus deren Elektronenhülle ein oder mehrere Elektronen herausgelöst werden. Diesen Vorgang nennt man **Ionisation**.

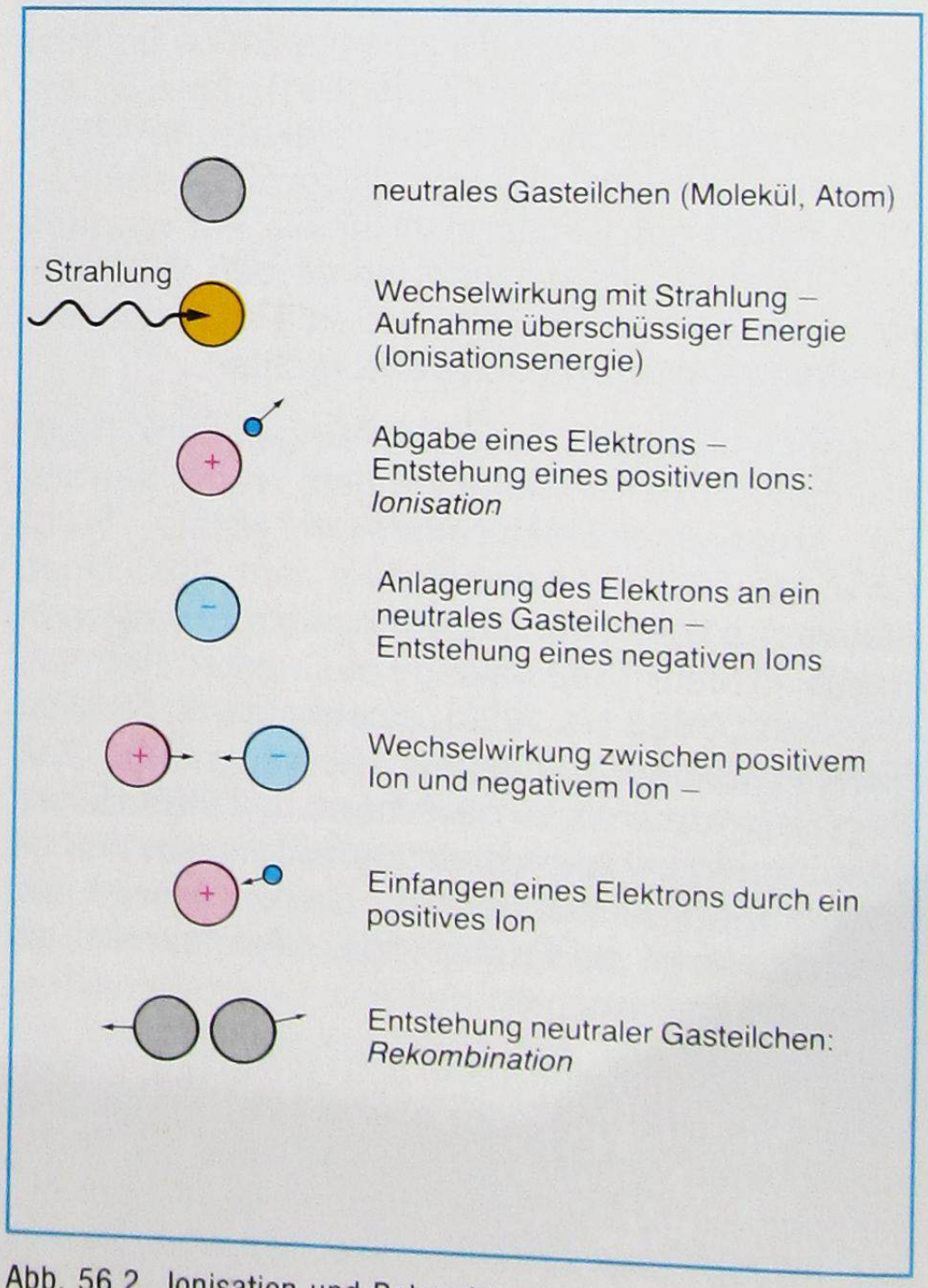


Abb. 56.2. Ionisation und Rekombination bei Gasteilchen

Die freigesetzten Elektronen lagern sich i. A. wieder an neutrale Gasteilchen an. Es entstehen also elektrisch positiv und negativ geladene Gas-Ionen. Infolge ihrer thermischen Bewegung stoßen auch positiv und negativ geladene Gas-Ionen zusammen und können sich dabei wieder neutralisieren (= Rekombination, *Abb. 56.2.*).

Die durch die ionisierende Strahlung spontan erzeugten Ladungsträger (spontane Ionisation – etwa 10^3 bis 10^4 Ionen je cm^3 Luft) sind im Vergleich zu den im Normalzustand eines Gases vorhandenen Gasteilchen (etwa $2{,}7 \cdot 10^{-9}$ je cm^3 Luft) verschwindend wenig. Gase sind deshalb i. A. sehr schlechte elektrische Leiter.

Zusammenfassung

1. Gase enthalten frei bewegliche Ladungsträger (elektrisch positiv und negativ geladene Gas-Ionen), die infolge der Einwirkung von Strahlung (kosmische Strahlung, UV-Strahlung, radioaktive Strahlung) entstanden sind.

2. Auf Grund ihrer verschwindend geringen Zahl gegenüber der Gesamtzahl aller Gasteilchen sind Gase im Allgemeinen sehr schlechte elektrische Leiter.

Aufgaben

1. Gase sind bei Normaldruck Isolatoren. Nimm zu dieser Aussage Stellung.
2. Welche Arten von Ladungsträgern können in einem Gas vorhanden sein?
3. Nenne die Voraussetzungen für das Fließen des elektrischen Stromes in Gasen.
4. Was versteht man unter Ionisation?

5.3. Gase als Leiter – unselbständige Gasentladung

Thermische Ionisation

Versuch

Wir stellen bei unserer Versuchsanordnung *(Abb. 57.1.)* eine Spannung von 7 kV ein. Dann entzünden wir eine Kerze und stellen sie so, dass die Flamme zwischen den beiden Metallkugeln brennt.
Beobachtung. Befinden sich zwischen den Metallkugeln heiße Flammengase, so zeigt der Strommesser einen elektrischen Strom (etwa 2 mA) an. Die Flamme wird in die Breite auseinandergezogen *(Abb. 57.2.)*.
In einem heißen Gas müssen demnach mehr bewegliche elektrisch positiv und negativ geladene Ladungsträger (Ionen) vorhanden sein als in einem kalten Gas *(Abb. 57.2.)*.

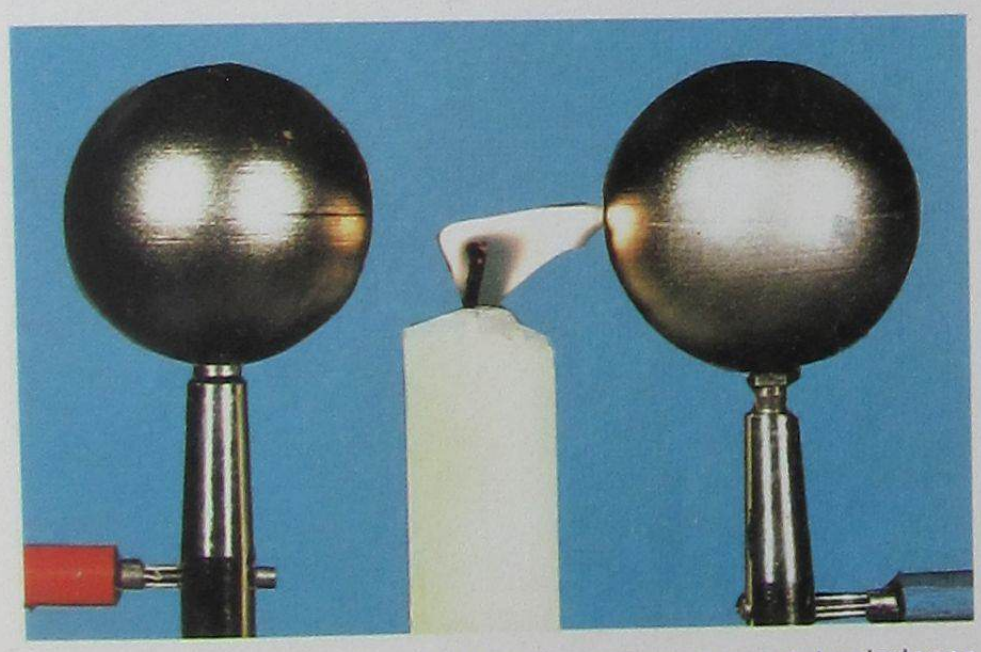


Abb. 57.1. Im elektrischen Feld zweier entgegengesetzt geladener Kugeln wird eine Flamme in die Breite auseinandergezogen.

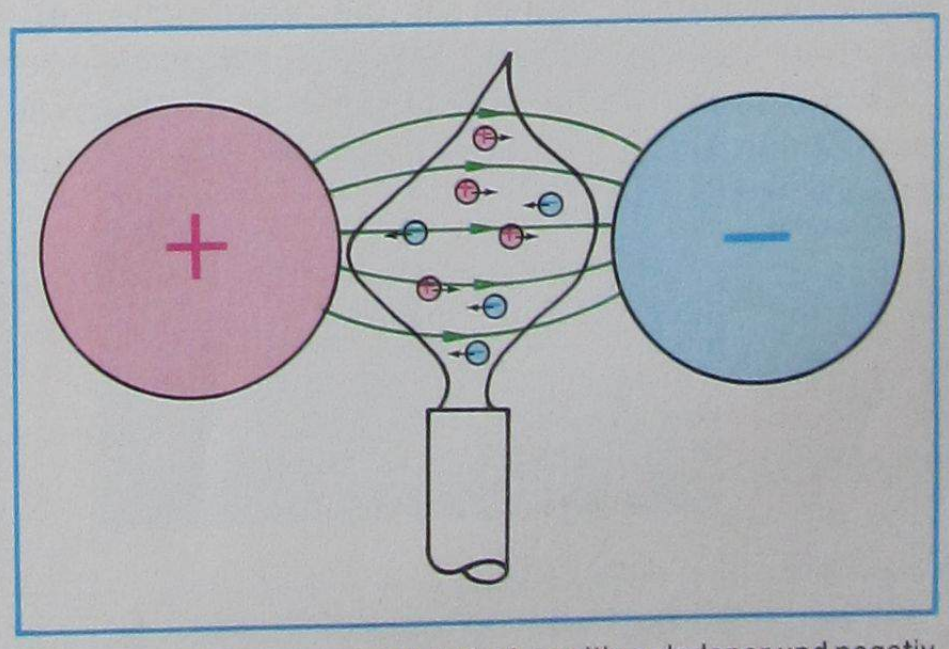


Abb. 57.2. Driftbewegung elektrisch positiv geladener und negativ geladener Ionen in einem heißen Gas

Durch Zufuhr von Wärme (Energie) wird die Heftigkeit der thermischen Bewegung der Gasteilchen so groß, dass bei ihren ständigen Zusammenstößen stets eine bestimmte Anzahl neutraler Gasteilchen ionisiert wird.
Man spricht in diesem Fall von **thermischer Ionisation**.

Zusammenfassung

1. Ionisation eines Gases kann sowohl durch Zufuhr von Wärme als auch durch Bestrahlen des Gases mit ultraviolettem Licht, mit Röntgenstrahlung oder mit radioaktiver Strahlung erfolgen.
2. Wird ein Gas durch Energiezufuhr von außen ionisiert und fließt in ihm ein elektrischer Strom, so spricht man von einer unselbständigen Gasentladung *(Abb. 58.1.)*.

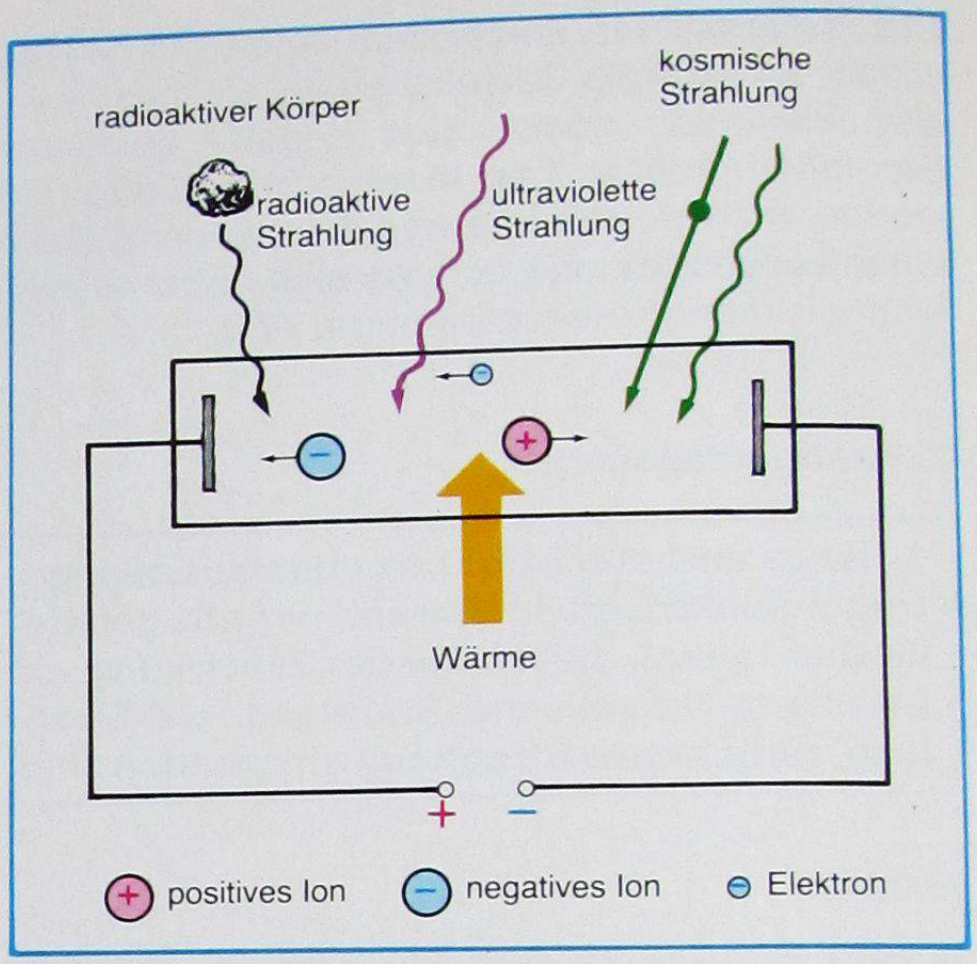


Abb. 58.1. Ionisation eines Gases durch Energiezufuhr von außen – unselbständige Gasentladung

Aus der Geschichte der Physik: Der photoelektrische Effekt

Die Einteilung der Stoffe in *Leiter* und *Nichtleiter* erfolgt erstmals durch den Engländer STEPHEN GRAY (1666 bis 1736), der an einer Glasröhre, die er auflud, beobachtete, dass auch die Korken am Ende der Glasröhre aufgeladen wurden. Er hielt deshalb Elektrizität für eine Flüssigkeit, die in die Korken gewandert war. Nichtleiter benannte er als *Isolatoren* nach dem lateinischen Wort für „Insel", denn ein Nichtleiter konnte nach seiner Meinung die „elektrische Flüssigkeit" aufnehmen, speichern und „umschließen" wie das Meer eine Insel.

Auch wenn in der Folgezeit andere Phänomene weitaus wichtiger waren als die elektrische Leitfähigkeit von Gasen, wurden doch immer wieder Entdeckungen gemacht, die mit der Leitfähigkeit von Gasen und der Elektrizitätsleitung im Vakuum zusammenhängen.

Eine Art „Abfallprodukt" war die Entdeckung des photoelektrischen Effekts durch den deutschen Physiker HEINRICH RUDOLPH HERTZ (1857 bis 1894).

Er untersuchte elektromagnetische Effekte und baute dazu einen sogenannten oszillierenden Stromkreis, bei dem der Strom abwechselnd in zwei durch eine Lücke getrennte Metallkugeln floss. Jedes Mal wenn die Spannung in der einen oder anderen Richtung ihr Maximum erreichte, sprang ein Funke über. Im Verlauf seiner Experimente machte HERTZ die Beobachtung, dass der Funke schneller überspringt, wenn ultraviolettes Licht auf den negativen Pol der Lücke scheint.

Er hatte damit den *photoelektrischen Effekt* entdeckt, den Einfluss von Licht auf elektrische Phänomene.

5.4. Gase als Leiter bei vermindertem Druck – selbständige Gasentladung

5.4.1. Stoßionisation – Glimmentladung

Wie wir schon wissen, können Gase unter bestimmten Bedingungen (z. B. bei niedrigem Druck in einer Glimmlampe) elektrische Leiter sein.

Versuch

Eine mit Luft gefüllte Glasröhre, in die zwei etwa 40 cm voneinander entfernte Metallelektroden eingeschmolzen sind (Entladungsröhre), wird auf eine Vakuumpumpe mit angeschlossenem Manometer aufgesetzt. Die Elektroden werden über einen Strommesser mit den Polen einer Gleichspannungsquelle (7 kV) verbunden *(Abb. 59.1.)*. Die Hochspannung wird eingeschaltet und die Luft aus der Röhre langsam abgepumpt. Dabei beobachtet man das Manometer, den Strommesser und das Innere der Glasröhre.

Beobachtung. Zunächst stellt man nur das Absinken des Gasdruckes fest, bis dann bei ca. 50 hPa Gasdruck plötzlich ein Stromfluss (2 mA) angezeigt wird. In der Röhre ist dann ein violettes, unregelmäßiges Lichtband zwischen den Elektroden zu sehen *(Abb. 59.2.a.)*. Bei weiter sinkendem Druck entsteht eine rötlich leuchtende Säule, die bei der Anode beginnt und den ganzen Rohrquerschnitt füllt (positive Säule). Vor der Kathode ist zwischen zwei Dunkelräumen das bläuliche negative Glimmlicht sichtbar (*Abb. 59.2.b.*; Gasdruck: 50 hPa, Stromstärke 1,3 mA). Nun verblasst die rote Glimmlichtsäule, wird kürzer und löst sich in abwechselnd helle und dunkle Schichtungen auf. Die Kathode ist jetzt von einer bläulichen Glimmhaut überzogen (*Abb. 59.2.c.*; Gasdruck: 1 hPa, Strom: 0,8 mA). Bei sehr geringem Gasdruck (0,02 hPa) hören die Glimmlichterscheinungen trotz Stromflusses (0,01 mA) ganz auf. Es ist jetzt ein grünliches Aufleuchten der Rohrwand in der Nähe der Kathode zu beobachten *(Abb. 59.2.d.)*. Bei noch weiter sinkendem Gasdruck (0,001 hPa) geht die Stromanzeige allmählich auf 0,000 mA zurück und das grünliche Fluoreszieren der Glaswand verschwindet wieder.

Deutung des Leitungsmechanismus

Zwischen den Elektroden wird durch die anliegende Spannung ein elektrisches Feld erzeugt, in dem bewegliche Ladungsträger durch elektrische Feldkräfte beschleunigt werden (elektrisch positiv geladene Ladungsträger in Richtung Kathode, elektrisch negativ geladene Ladungsträger in Richtung Anode). Verringert man den Gasdruck, so wird einerseits die Anzahl der neutralen Gasteilchen und die Anzahl der durch spontane Ionisation stets vorhandenen Gas-Ionen verkleinert, andererseits werden die Flugstrecken der Gasteilchen zwischen ihren Zusammenstößen *(freie Weglängen)* größer. Größere freie Weglängen ermöglichen den elektrischen Feldkräften, die Ladungsträger längere Zeit zu beschleunigen, so dass diese eine größere Geschwindigkeit und damit eine größere kinetische Energie vor ihrem nächsten Aufprall erhalten.

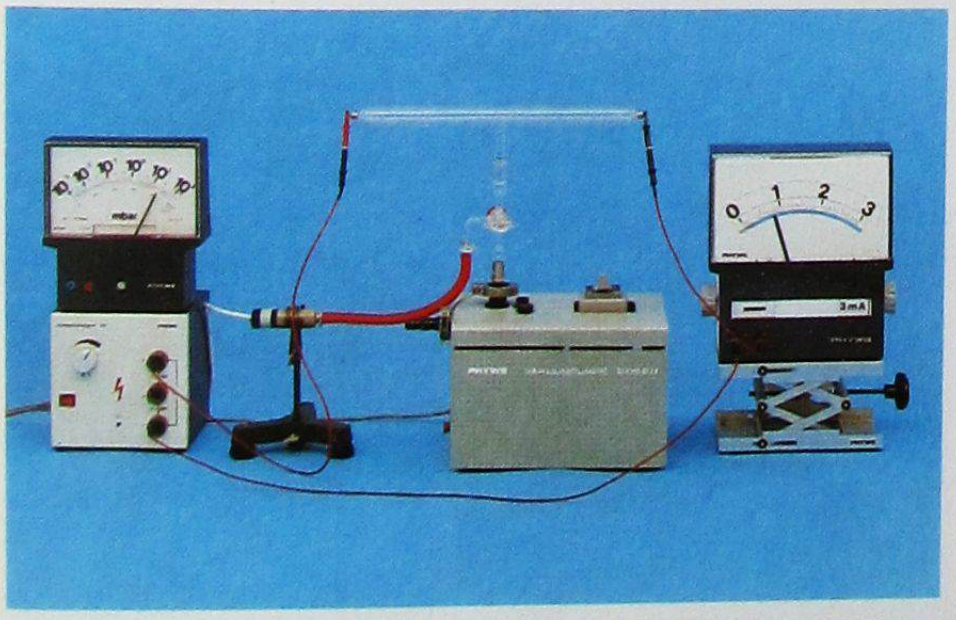


Abb. 59.1. Versuchsaufbau für die selbständige Gasentladung bei vermindertem Druck. (Im Innern der Hochspannungsquelle befindet sich der Schutzwiderstand *R*.)

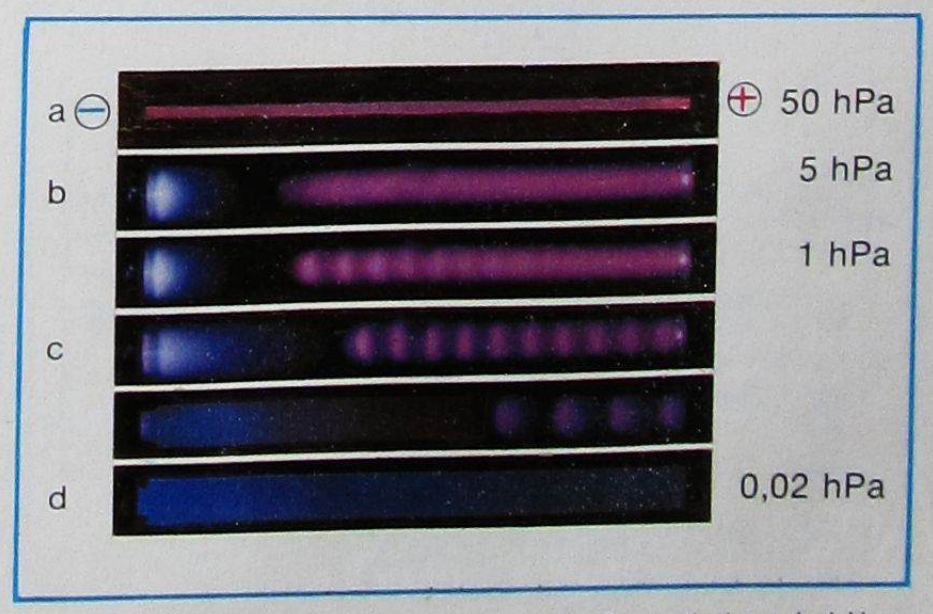


Abb. 59.2. Lichterscheinungen bei einer Gasentladung bei Verminderung des Gasdrucks

Das Versuchsergebnis ist in *Abb. 59.2.* dargestellt. Der bis zu einem Gasdruck von 50 hPa fließende elektrische Strom aus spontan erzeugten Ladungsträgern ist so gering, dass er vom Strommesser noch nicht angezeigt wird.

Bei 50 hPa Gasdruck und einer Spannung von 7 kV reicht die kinetische Energie der auf die Kathode aufprallenden elektrisch positiv geladenen Gas-Ionen aus, um aus dieser Elektronen herauszulösen. Diese werden nun wegen ihrer überaus geringen Masse sehr rasch auf große Geschwindigkeiten in Richtung Anode beschleunigt. Schon nach kurzer Flugzeit erreichen diese Elektronen dann eine hinreichende kinetische Energie, um aus neutralen Gas-Molekülen je ein Elektron herauszuschlagen. Dieser Vorgang wird **Stoßionisation** genannt. Die freigesetzten Elektronen können nun ihrerseits durch Stoßionisation weitere neutrale Gasteilchen ionisieren, so dass schlagartig eine Ladungsträgerlawine erzeugt wird *(Abb. 60.1.)*.

Die elektrische Stromstärke würde immer größer und die Röhre schließlich zerstört werden, würde nicht ein in den Stromkreis eingebauter Schutzwiderstand R im gleichen Maße, wie die Stromstärke I anwächst, die zwischen den Elektroden liegende Spannung U nach der Beziehung $U = R \cdot I$ herabsetzen (vgl. *Abb. 59.1.*).

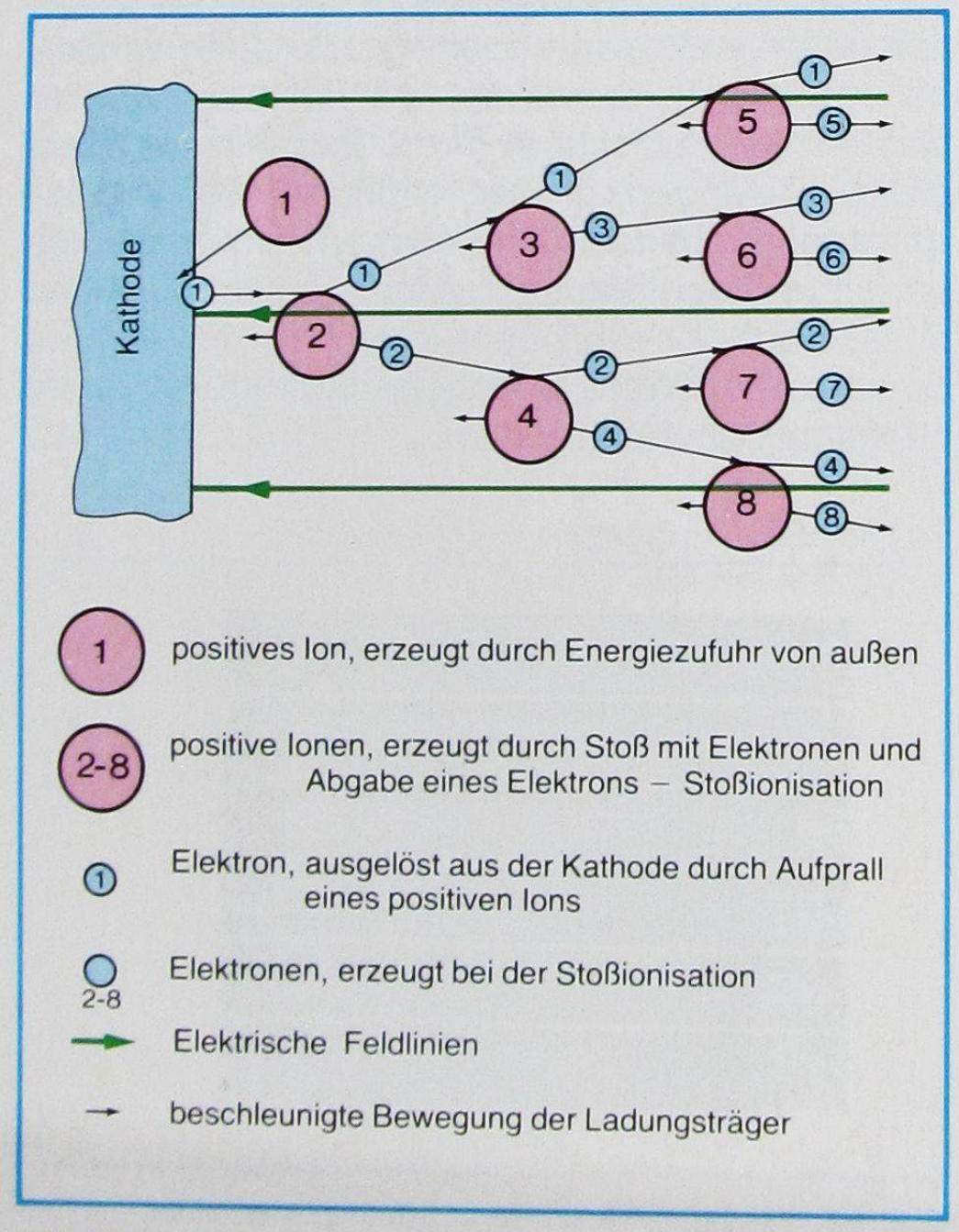


Abb. 60.1. Stoßionisation – Entstehung einer Ladungsträgerlawine – selbständige Gasentladung

Der elektrische Strom in einem Gas mit geringem Druck wird durch die Driftbewegung der aus der Kathode stammenden Elektronen sowie durch die bei der Stoßionisation entstandenen Elektronen im elektrischen Feld verursacht. Da die Ladungsträger infolge des Stromflusses durch Stoßionisation im Gas selbst erzeugt werden und dabei besondere Glimmlichterscheinungen auftreten, spricht man von einer **selbständigen Gasentladung** bzw. von einer *Glimmlichtentladung.*

Wird bei einer selbständigen Gasentladung die Spannung zwischen den beiden Elektroden erniedrigt, so erlischt die Entladung bei einer bestimmten Spannung *(Löschspannung).* Bei anschließender Erhöhung der Spannung setzt die Gasentladung erst bei einer *Zündspannung* ein, die etwas höher ist als die Löschspannung.

5.4.2. Deutung der Glimmlichterscheinungen

Die beim Stromfluss in Gasen auftretenden Leuchterscheinungen erklärt man mit der Vorstellung, dass Gasteilchen, die bei Zusammenstößen untereinander, bei der Stoßionisation oder bei Rekombinationen aufgenommenen überschüssigen Energien in Form von Lichtblitzen wieder abgeben *(Abb. 61.1.).* Wegen der ungeheuer großen Zahl von Gasteilchen, die Lichtblitze aussenden, sehen wir gleichmäßige Leuchtschichten. In den dunklen Zonen erhalten die Gasteilchen nicht die zur Lichtaussendung erforderlichen überschüssigen Energien. Die Farbe des Glimmlichts hängt von der Größe der als Lichtblitz abgestrahlten überschüssigen Energie bzw. von der Stoffart der Gasteilchen ab.

5.4.3. Anwendungen der Glimmentladung

Glimmlampen. Die beiden Elektroden haben einen geringen Abstand und sind, je nach dem Verwendungszweck der Lampe, verschieden geformt. Der Glaskolben enthält i. A. Neon und etwas Helium mit einem Druck von 1 hPa bis 20 hPa. Während des Betriebs der Glimmlampe ist die Kathode mit dem (negativen) Glimmlicht überzogen; die positive Säule ist verkümmert. Glimmlampen werden zur *Notbeleuchtung*, als *Signallampen* und als *Polsuchlampen* verwendet *(Abb. 61.2.)*.

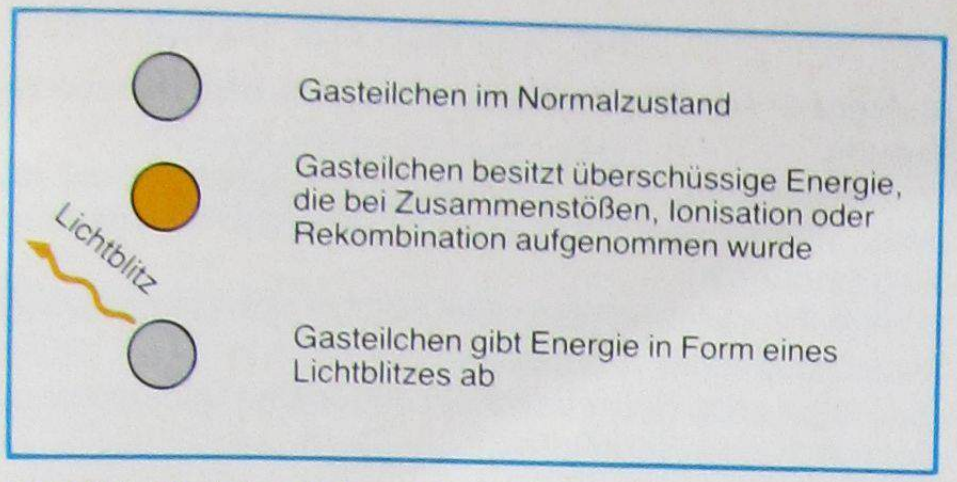


Abb. 61.1. Modellvorstellung für die Entstehung der Leuchterscheinungen bei der Glimmentladung

Abb. 61.2. Verschiedene Ausführungsformen von Glimmlampen

Leuchtröhren. Man nützt das Licht der elektrisch positiven Säule für die Lichtreklame. Je nach der Gasfüllung leuchtet die Röhre in einer bestimmten Farbe (*Neon:* rot; *Helium:* rosa; *Kohlenstoffdioxid:* bläulich weiß; *Argon:* blau).

UV-Lampen. Es handelt sich hier um *Quecksilberdampflampen*, die bei der Gasentladung neben einem schwachen, fahlblauen Licht viel unsichtbare ultraviolette Strahlung aussenden. Die Lampenkolben bestehen aus Quarzglas, weil normales Glas UV-Strahlung weitgehend absorbiert.

Leuchtstoffröhren. Sie enthalten neben einem Edelgas (z. B. Argon) hauptsächlich Quecksilberdampf. Um die Ultraviolettstrahlung für die Lichtaussendung nutzen zu können, überzieht man die Innenwand der Röhre mit einem fluoreszierenden Leuchtstoff, der weißes Licht aussendet, wenn ultraviolette Strahlung auftritt *(Abb. 61.3.)*. Diese Lichtaussendung erfolgt bei niedriger Temperatur (sog. *kaltes Licht*), so dass Wärmeverluste sehr gering sind. Die Energieausbeute bei Leuchtstofflampen (20 % der aufgewandten Energie werden als Licht abgestrahlt) ist wesentlich größer als bei Glühlampen (5 %). Leuchtstofflampen (Zündspannung über 300 V) werden durch einen besonderen Starter und Glühelektroden in Betrieb gesetzt.
Zur Begrenzung der Stromstärke ist ein Vorschaltgerät (Drossel) erforderlich *(Abb. 61.4.)*.
Gasentladungslampen können auch mit Wechselspannung betrieben werden.

Energiesparlampen funktionieren wie Leuchtstoffröhren. Sie sind nur so gebaut, dass sie in Glühlampenfassungen eingeschraubt werden können.
Trotz der relativ hohen Anschaffungspreise im Vergleich zu normalen Glühbirnen, setzen sich Energiesparlampen wegen ihrer langen Lebensdauer und wegen der geringen Energie, die sie benötigen, mehr und mehr durch.
Energiesparlampen lohnen sich vor allem in Arbeits- und Wohnräumen, die über eine lange Zeit beleuchtet werden, nicht dagegen für kurzzeitige Beleuchtung z. B. in Treppenhäusern.

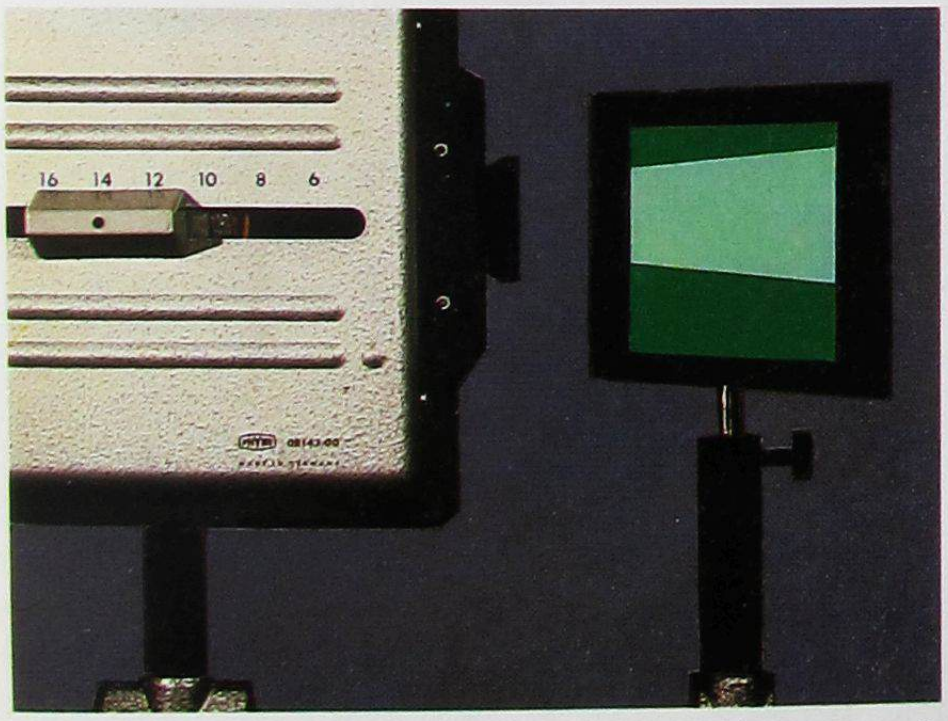


Abb. 61.3. Eine Zinksulfidschicht leuchtet bei Bestrahlung mit dem UV-Licht einer Quecksilberdampflampe hell auf.

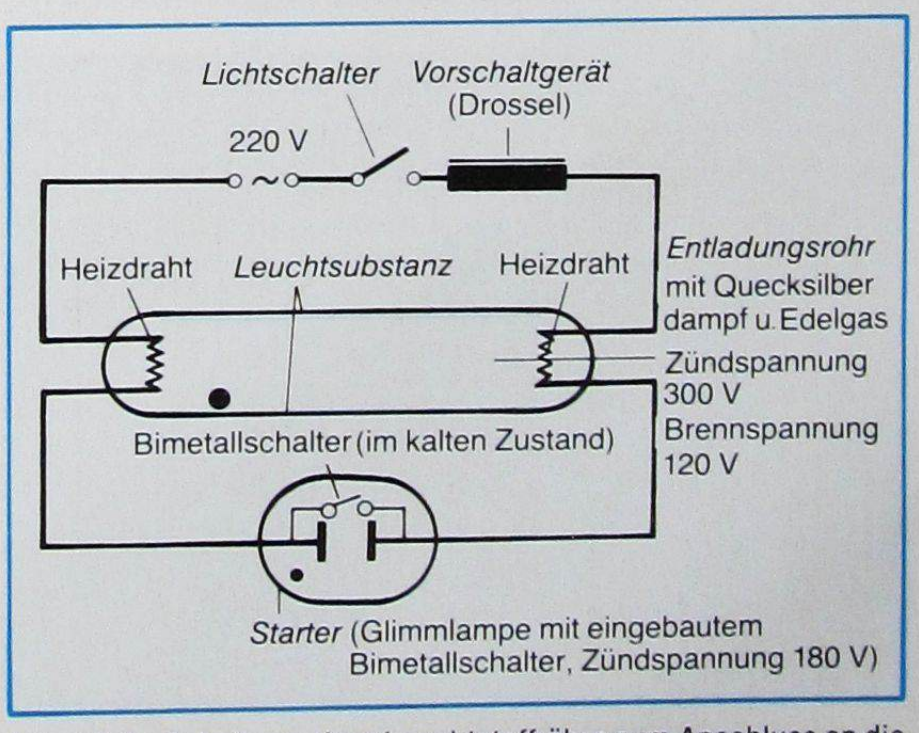


Abb. 61.4. Schaltung einer Leuchtstoffröhre zum Anschluss an die Netzspannung von 230 V

Aufgaben

1. Wie können neutrale Gasteilchen ionisiert werden?
2. Erläutere die Voraussetzungen und das Zustandekommen einer Stoßionisation.
3. Erläutere das Zustandekommen einer Ladungsträgerlawine.
4. Nenne gemeinsame und verschiedene Merkmale der unselbständigen und der selbständigen Gasentladung.
5. Wie entsteht das Glimmlicht bei einer Gasentladung?
6. Nenne Anwendungsmöglichkeiten der Glimmentladung.
7. Zur Zündung einer selbständigen Gasentladung ist eine Mindestspannung (Zündspannung) erforderlich. Begründung?
8. Welche Vor- und Nachteile besitzt eine Glimmlampe gegenüber einer Glühlampe?
9. Zeichne das Betriebsschaltbild für eine Glimmlampe. Begründe den Schaltplan.

Zusammenfassung

1. Selbständige Gasentladung tritt in Gasen beim Überschreiten der Zündspannung ein.
2. Die erforderlichen Ladungsträger (Ionen, Elektronen) werden im Gas selbst durch Stoßionisation erzeugt.
3. Die selbständige Gasentladung ist i. A. mit charakteristischen Leuchterscheinungen verbunden.

Aus der Geschichte der Physik: Benjamin Franklin und der Blitzableiter

Im Jahr 1745 hatte der holländische Physiker Pieter von Musschenbroek (1692 bis 1761) die erste *leidener Flasche* gebaut, mit der sich Ladungen speichern ließen. Leidener Flaschen wurden zum Lieblingsspielzeug der Wissenschaftler, die sich zu jener Zeit mit Elektrizität beschäftigten.

Der Amerikaner Benjamin Franklin (1706 bis 1790) stellte fest, dass bei der Entladung einer leidener Flasche ein Funke und ein knisterndes Geräusch entstehen. Er brachte dieses Phänomen mit Blitz und Donner aus der Natur in Verbindung. Er schloss daraus, dass bei einem Gewitter Himmel und Erde eine riesige leidener Flasche bilden und Blitz und Donner entsprechend gigantische Entladungen darstellen.
Um dies zu untersuchen, ließ er im Jahr 1751 einen Drachen mit einer Spitze aus Metall steigen, an der ein langer seidener Faden mit einem Metallschlüssel am Ende hing. Franklin hielt diesen Faden mittels eines zweiten Seidenfadens. Als sich Gewitterwolken bildeten, hielt Franklin seinen Fingerknöchel an den Schlüssel: Es funkte und knisterte. Er konnte damit sogar eine leidener Flasche aufladen. Über die Gefährlichkeit seiner Versuche war sich Franklin nicht im Klaren. Bei einem Versuch mit einem Blitzableiter wurde später übrigens der St. Petersburger Physikprofessor Georg Wilhelm Richmann getötet.

Aus diesem Versuch entwickelte Franklin den ersten Blitzableiter, indem er einen spitzen Metallstab auf dem Dach eines Gebäudes anbrachte und mit dem Erdboden verband. Diese Art des Blitzschutzes erwies sich als äußerst wirkungsvoll und setzte sich erst in Amerika, dann in Europa schnell durch. Zum ersten Mal in der Geschichte versuchte der Mensch, Naturkatastrophen nicht durch Gebete oder Zaubersprüche zu verhindern, sondern durch das Verständnis der Naturwissenschaften und daraus resultierende technische Entwicklungen.

5.5. Gase als Leiter bei Atmosphärendruck – Funkenentladung – Lichtbogen

Elektrische Funkenentladungen, also selbständige Gasentladungen bei Atmosphärendruck kennen wir z. B. als Blitze beim Gewitter, als Funken beim Ausschalten elektrischer Geräte oder an den Oberleitungen von Zügen bzw. Straßenbahnen.

Versuch **Vorsicht! Hochspannung!**

An zwei isolierte, etwa 2 cm voneinander entfernte Metallkugeln wird unter Zwischenschaltung eines Strommessers und eines Widerstandes eine Hochspannung von ca. 7 kV angelegt. Die Kugeln werden einander ganz langsam genähert *(Abb. 63.1.)*.

Beobachtung. Zunächst passiert nichts. Bei einer Entfernung von etwa 2 mm hört man plötzlich ein knisterndes Geräusch und stellt am Strommesser einen elektrischen Strom von 1,3 mA fest. Bei weiterer Annäherung der Kugeln springen Funken mehr oder weniger laut knallend von einer Kugel zur anderen über. Schließlich entsteht ein dauernd brennender Lichtbogen (Entfernung der Kugeln: 1 mm; Stromstärke: 18 mA).

Versuche

1. Hält man ein Holzstäbchen in den Lichtbogen, so wird es nach kurzer Zeit entzündet.

2. Wird die Spannung zwischen den Kugeln verkleinert, so erlischt der Lichtbogen. Erhöht man die Spannung wieder, so zündet der Lichtbogen erneut.

3. Entfernt man nach dem Zünden des Lichtbogens die beiden Kugeln voneinander, so wird der Lichtbogen länger und reißt dann plötzlich ab.

Erklärung. Infolge der hohen elektrischen Spannung zwischen den beiden Kugeln und ihrer geringen gegenseitigen Entfernung entsteht ein sehr starkes elektrisches Feld. Leitungselektronen, die in der Oberfläche der Kathode im Überschuss vorhanden sind, können durch die elektrischen Feldkräfte freigesetzt und in Richtung Anode beschleunigt werden *(Feldemission)*. Durch Stoßionisation (und thermische Ionisation) wird nun eine Ladungsträgerlawine erzeugt, und es entsteht eine kurz andauernde, selbständige Gasentladung *(Funkenentladung)* bzw. eine dauerhafte selbständige Gasentladung bei Atmosphärendruck *(Lichtbogen)*. Der elektrische Strom im Lichtbogen würde über alle Maßen ansteigen und die Geräte zerstören, wenn er nicht durch den eingebauten Schutzwiderstand begrenzt würde.

5.5.1. Gewitter, Blitz und Donner

Die wohl eindrucksvollste Funkenentladung bei normalem Gasdruck ist der Blitz *(Abb. 63.2.)*. Vor und während des Gewitters finden durch komplizierte, noch nicht ganz geklärte Vorgänge in der Atmosphäre und durch elektrische Influenz Ladungstrennungen in großem Umfang statt. Dadurch können unterschiedliche Ladungen innerhalb einer Wolke, zwischen verschiedenen Wolken oder zwischen einer Wolke und der Erde entstehen, wobei sehr hohe elektrische Spannungen (bis 100 MV) und damit auch sehr starke elektrische Felder entstehen. Wird die für die

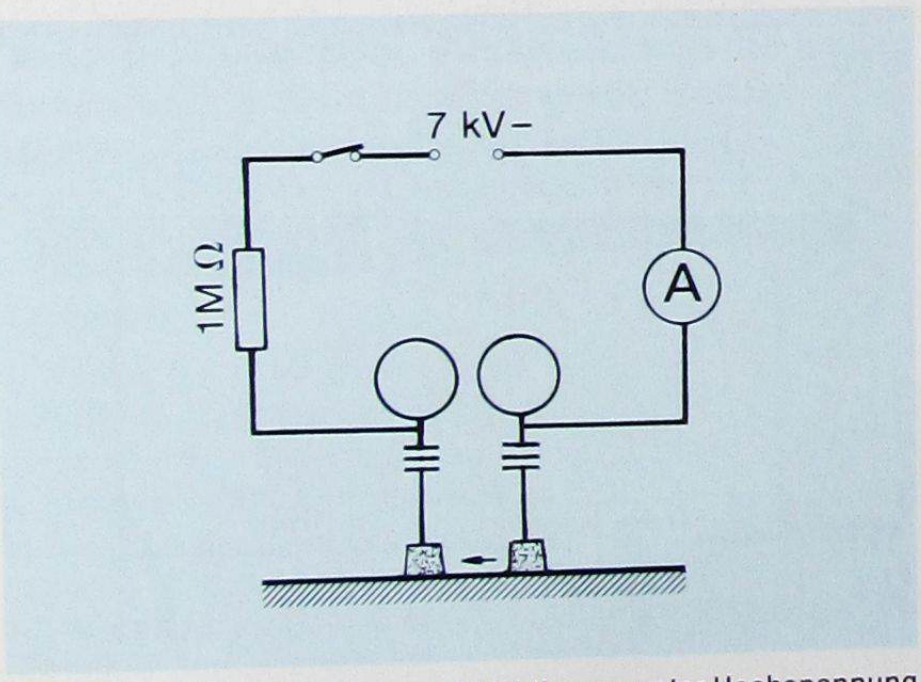


Abb. 63.1. Funkenentladung und Lichtbogen unter Hochspannung bei Atmosphärendruck

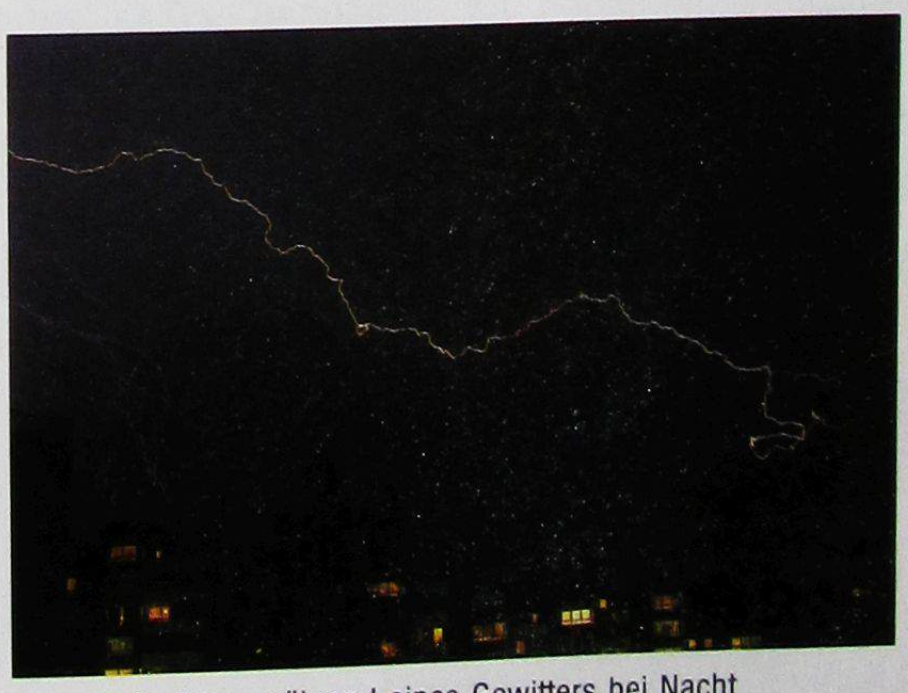


Abb. 63.2. Blitze während eines Gewitters bei Nacht

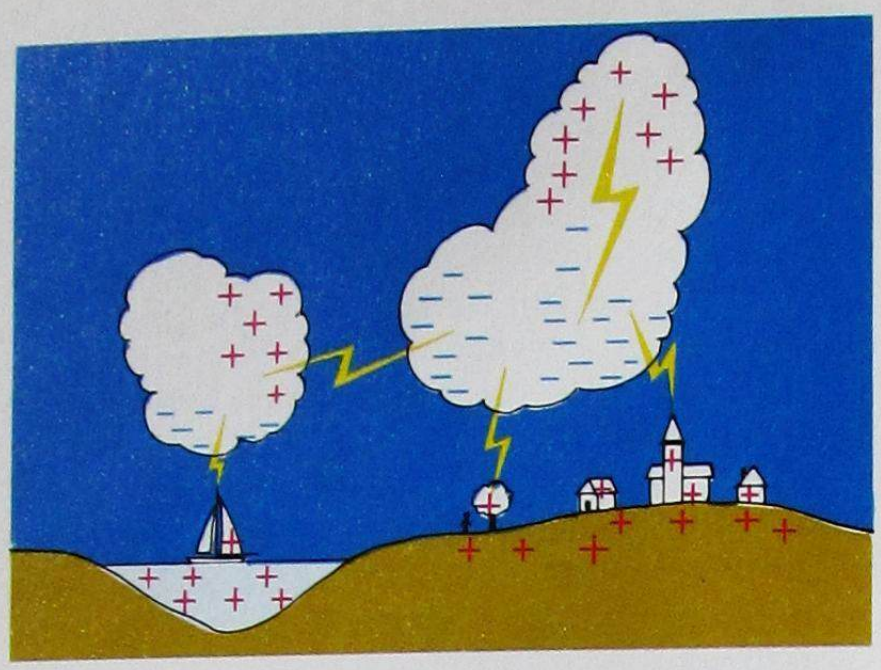


Abb. 64.1. Blitzeinschläge in aus der Umgebung herausragende Gegenstände

Stoßionisation bei Atmosphärendruck erforderliche Zündspannung erreicht, so gleichen sich die entgegengesetzten elektrischen Ladungen in Form von gewaltigen Funken (Stromstärken bis 100 000 A), den *Blitzen*, aus. Im Blitzkanal wird die Luft wegen der starken Ströme schlagartig sehr stark erhitzt (bis 30 000 °C). Sie dehnt sich dabei explosionsartig aus und erzeugt dadurch eine Druckwelle, die als *Donner* wahrnehmbar ist.

Die auf der Erde durch eine elektrische Gewitterwolke influenzierte elektrische Ladung sitzt besonders dicht in Gegenständen, die aus der Umgebung herausragen (z. B. Türme, Masten, allein stehende Gebäude, Bäume, Gipfelkreuze auf Bergen, Mensch und Tier auf freiem Feld). In der Umgebung dieser „Spitzen" herrschen besonders starke elektrische Felder, so dass der Entladungsfunke seinen Weg bevorzugt über diese Gegenstände zur Erde wählt *(Abb. 64.1.)*.
Blitzableiteranlagen an Gebäuden sollen dem Blitz einen ungefährlichen Weg zur Erde zur Verfügung stellen.

5.5.2. Spitzenentladung

Besitzt ein geladener Körper Spitzen oder scharfe Kanten, so strömen bei genügend großer Ladungsdichte und damit hinreichend großer elektrischer Feldstärke Elektronen aus diesem heraus (elektrisch negativ geladener Körper) bzw. in diesen hinein (elektrisch positiv geladener Körper). Dabei finden Entladungen statt, die bei einer entsprechend hohen Anzahl von kleinen Funken im Dunkeln oft als Glimmlicht sichtbar werden.

Ein Beispiel dafür ist das *Elmsfeuer* auf Schiffen, kleine „Flammen", die bei entsprechender Aufladung in der Atmosphäre an „Spitzen" auf dem Schiff sichtbar werden. Elmsfeuer treten aber auch im Gebirge auf, z. B. auf Menschen, auf einem Eispickel, den man hält, auf Stahlseilen, die als Sicherung am Felsen angebracht sind, an den Spoilern von Rennwagen (Umschlagfoto) usw. Sie sind in jedem Fall ein Hinweis auf eine starke Aufladung in der Atmosphäre und oft Vorboten eines drohenden Gewitters.

5.5.3. Kohlenlichtbogen

Vorsicht! Der Kohlenlichtbogen darf nur durch gefärbtes Schutzglas betrachtet werden!

Bringt man zwei über einen Widerstand mit einer Gleichspannungsquelle verbundene Kohlestäbe kurz zur Berührung und zieht sie dann wieder etwas auseinander, so bildet sich zwischen den Kohlenspitzen ein bläulich-violetter Lichtbogen aus *(Abb. 64.2.)*. Die beiden Kohlenspitzen werden bis zur Weißglut erhitzt (bis ca. 4000 °C). Der elektrisch positiv geladene Kohlestab höhlt sich kraterförmig aus, der negative Kohlestab brennt kegelförmig ab.

Erklärung. Während der Berührung der Kohlestäbe erwärmt der elektrische Strom die kleine Berührungsstelle so stark, dass die Kohlen dort zum Glühen kommen. Eine glühende Kathode (elektrisch negativ geladener Kohlestab) erleichtert den Austritt von Elektronen außerordentlich. Nach der Trennung der Kohlestäbe kann deshalb eine selbständige Gasentladung eintreten, wobei die Ionenbildung durch Stoßionisation überwiegend von den Elektronen hervorgerufen wird. Der elektrisch positiv geladene Kohlestab wird hauptsächlich durch den Aufprall von Elektronen erhitzt.

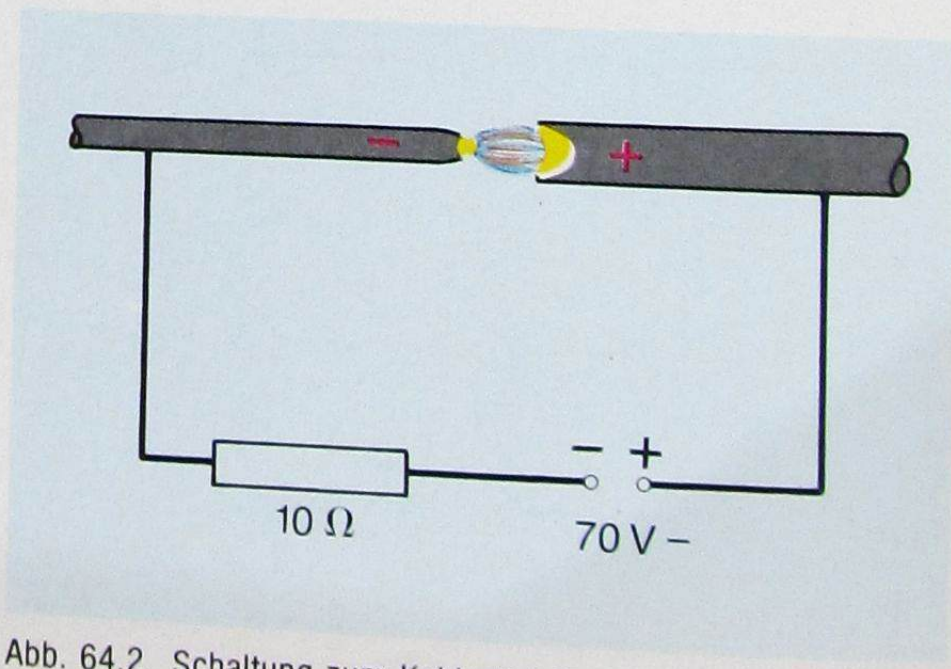


Abb. 64.2. Schaltung zum Kohlenlichtbogen

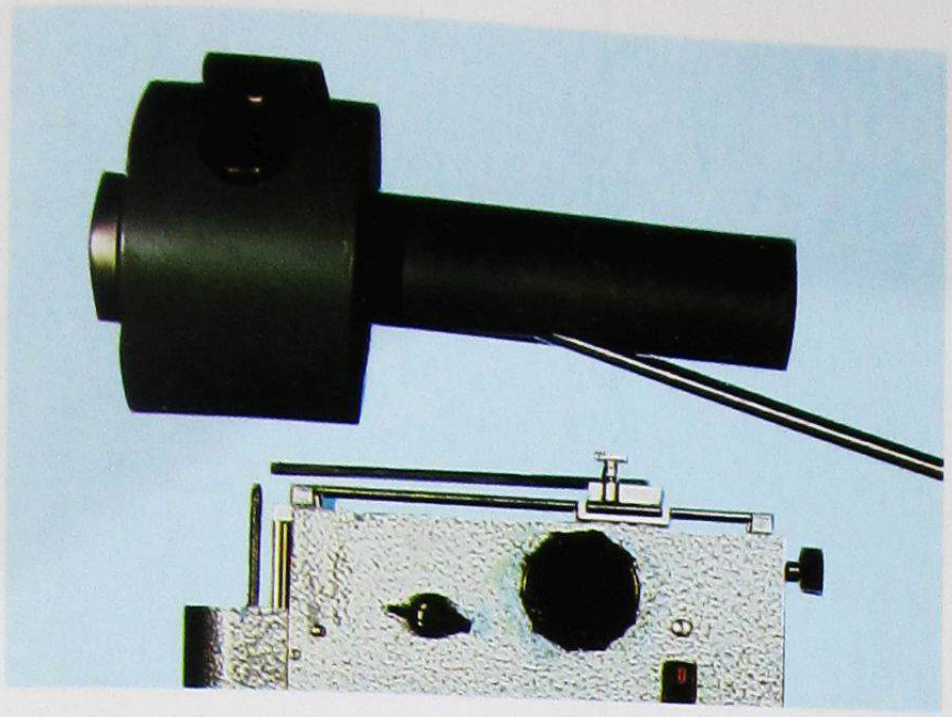


Abb. 65.1. Kohlenbogenlampe

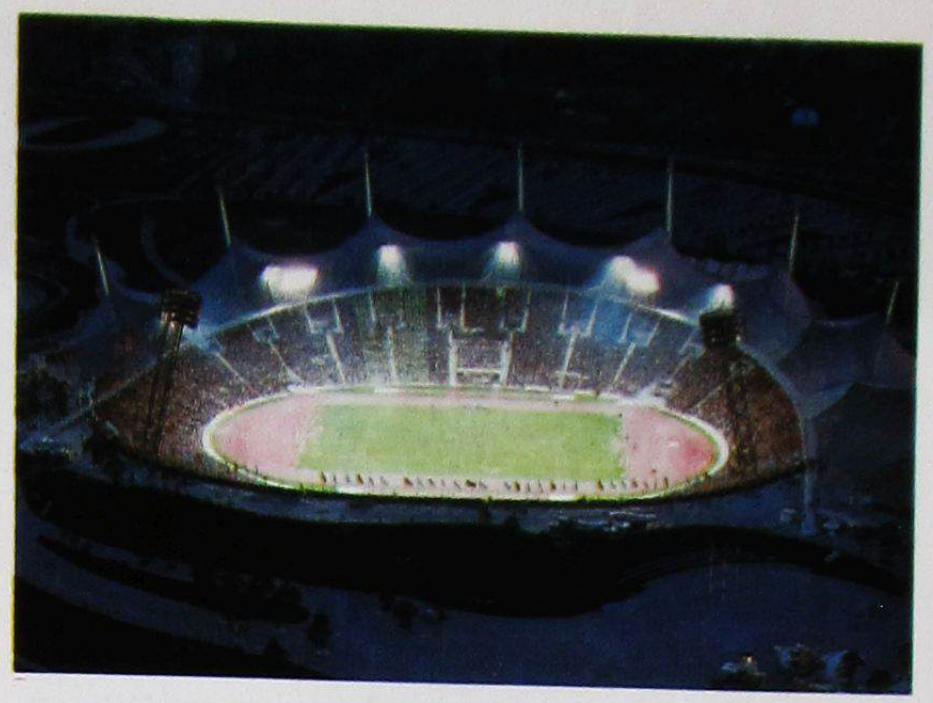


Abb. 65.2. Einsatz von Metalldampflampen bei der Flutlichtanlage eines Stadions

Der weißglühende Krater des elektrisch positiv geladenen Kohlestabes wird als sehr lichtstarke, fast punktförmige Lichtquelle für Versuchszwecke *(Abb. 65.1.)* und (früher) in *Projektionsgeräten* verwendet. Wegen der hohen Temperatur im Lichtbogen eignet sich der Hochstrombogen zwischen Metallelektroden (bis 7000 °C) zum Trennen und Schweißen von Metallkörpern. Er wird z. B. auch bei der *Stahlerzeugung (Elektrostahl-Verfahren)* und bei der Gewinnung von Calciumcarbid in Schmelzöfen eingesetzt.

In Metalldampflampen wird ebenfalls ein Lichtbogen erzeugt. Zur *Beleuchtung* z. B. von Straßen, Sportplätzen *(Abb. 65.2.)* oder großen Hallen finden *Natriumdampflampen* und *Quecksilberhochdrucklampen* Verwendung. Die *Xenonhochdrucklampe*, deren Licht dem natürlichen Sonnenlicht am nächsten kommt, wird heute in verstärktem Maße eingesetzt, u. a. in Scannern, um Farbvorlagen wie Fotos oder Zeichnungen in ihrer natürlichen Farbe in Computer einzulesen, damit sie dort weiterbearbeitet werden können.

Zusammenfassung

1. Besteht zwischen zwei Elektroden eine hinreichend große Spannung und ein genügend kleiner Abstand, so entsteht zwischen ihnen eine selbständige Gasentladung, die sich als Funkenentladung oder als Lichtbogen äußern kann.
2. Funkenentladungen kommen in der Natur beim Blitz oder beim Elmsfeuer vor. Sie treten bevorzugt in der Umgebung von Spitzen oder stark geladenen Gegenständen auf.
3. Lichtbögen benutzt man beim Kohlenlichtbogen oder in Metalldampflampen zur Erzeugung eines sehr hellen Lichts und im Hochstrombogen zum Trennen und Schweißen von Metallkörpern sowie bei der Stahlerzeugung und bei der Gewinnung von Calciumcarbid.

Aufgaben

1. Nenne die Voraussetzungen
a) für eine Spitzenentladung,
b) für eine Funkenentladung,
c) für eine Lichtbogenentladung.
2. Zeichne das Betriebsschaltbild einer Kohlenbogenlampe und erkläre deren Funktionsweise.
3. Welche Aufgabe hat ein Blitzableiter? Begründe die Art seiner Verlegung.
4. Was versteht man unter
a) unselbständiger Gasentladung,
b) selbständiger Gasentladung,
c) Glimmentladung,
d) Spitzenentladung,
e) Funkenentladung,
f) Lichtbogenentladung?
5. Nenne Anwendungsmöglichkeiten der Lichtbogenentladung.
6. Vergleiche den elektrischen Leitungsvorgang in Gasen mit dem in Metallen und in Flüssigkeiten.

6. Elektrizitätsleitung im Vakuum

6.1. Glühemission von Elektronen – Deutung des glühelektrischen Effekts

Als **Vakuum** bezeichnet man einen weitgehend gasfreien Raum. Im Vakuum einer Entladungsröhre konnten wir keinen Stromfluss feststellen (vgl. Kapitel 5.4.), da in diesem keine beweglichen Ladungsträger vorhanden sind. Ein Stromfluss im Vakuum einer Entladungsröhre *(Abb. 66.1.)* ist nur dann möglich, wenn Ladungsträger in ihr freigesetzt werden. In den Metallelektroden befinden sich die frei beweglichen Leitungselektronen, ähnlich wie die Teilchen eines Gases, in ständiger thermischer Bewegung. Trotzdem können sie das Kristallgitter (aufgebaut aus elektrisch positiv geladenen Metall-Ionen) nicht verlassen, da ihre kinetischen Energien nicht ausreichen, die in der Nähe der Metalloberfläche wirkenden rücktreibenden elektrischen Kräfte zu überwinden.

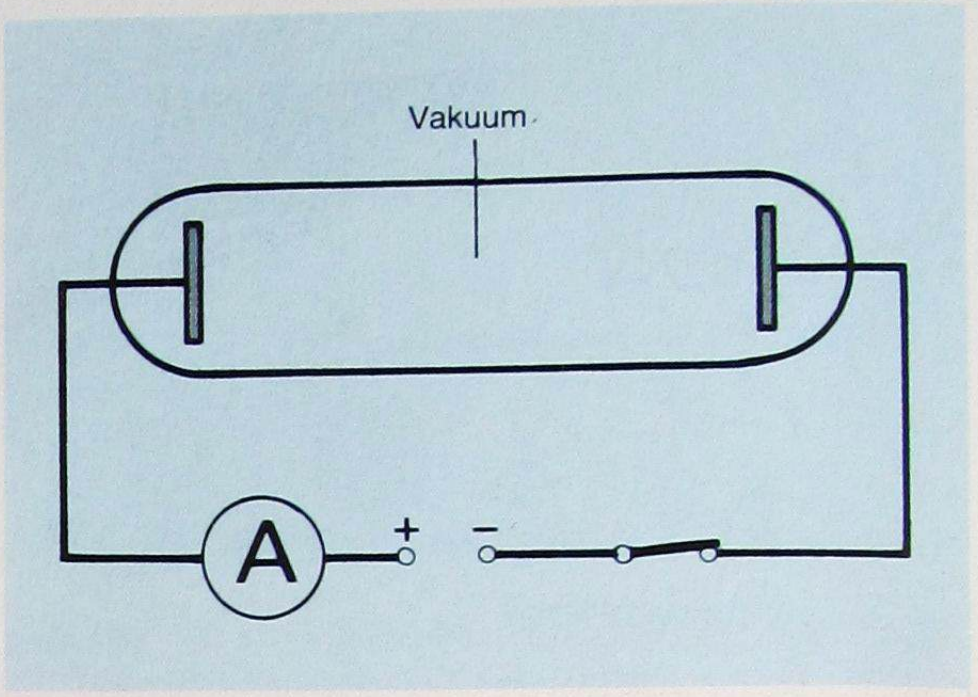


Abb. 66.1. Schaltskizze für eine Entladungsröhre – Elektrizitätsleitung im Vakuum erfordert elektrische Ladungsträger.

Versuche, die wir wegen ihrer Gefährlichkeit nicht durchführen dürfen, haben ergeben, dass im Vakuum bei genügend starkem elektrischem Feld, d. h. bei entsprechend hoher Spannung zwischen den Elektroden (ca. $5 \cdot 10^8$ V bei 50 cm Elektrodenabstand), Leitungselektronen aus der mit dem Minuspol verbundenen Metallelektrode (= Kathode) herausgerissen werden (*Feldemission*, vgl. Kap. 5.5., S. 63 f.). Diese freigesetzten Elektronen bewegen sich dann im elektrischen Feld zur Anode, d. h., im Vakuum fließt ein elektrischer Strom.

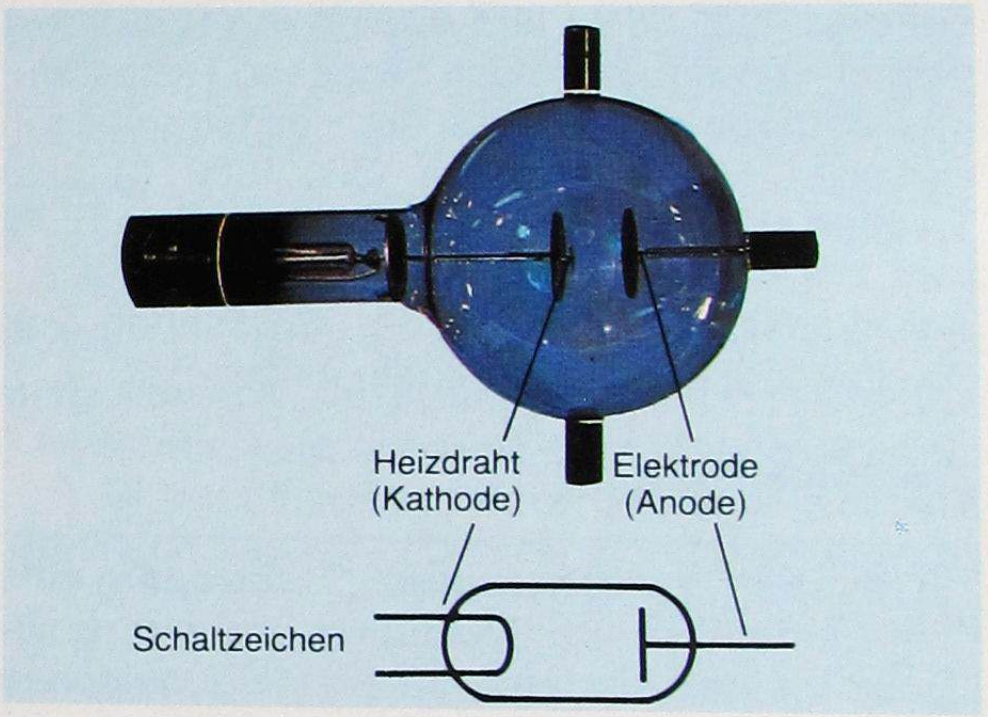


Abb. 66.2. Zweielektrodenröhre (Diode)

THOMAS ALVA EDISON (1847 bis 1931) entdeckte diesen Effekt bereits im Jahre 1883 (siehe S. 68). Diese Entdeckung macht man sich bei der *Zweielektrodenröhre* oder *Diode* zunutze *(Abb. 66.2.)*.

Versuche

In einem evakuierten Glaskolben sind ein Glühdraht aus Wolfram und eine plattenförmige Metallelektrode eingeschmolzen. Mit dieser Diode bauen wir eine Schaltung entsprechend *Abb. 66.3.* auf. Der Strom *I* im Vakuum dieser Röhre wird nun unter verschiedenen Bedingungen gemessen.

1. Zwischen Glühdraht (Kathode) und Metallelektrode (Anode) wird eine sog. Anodenspannung $U_A = 300$ V angelegt *(Abb. 67.1.a.)*. Es fließt kein Strom.

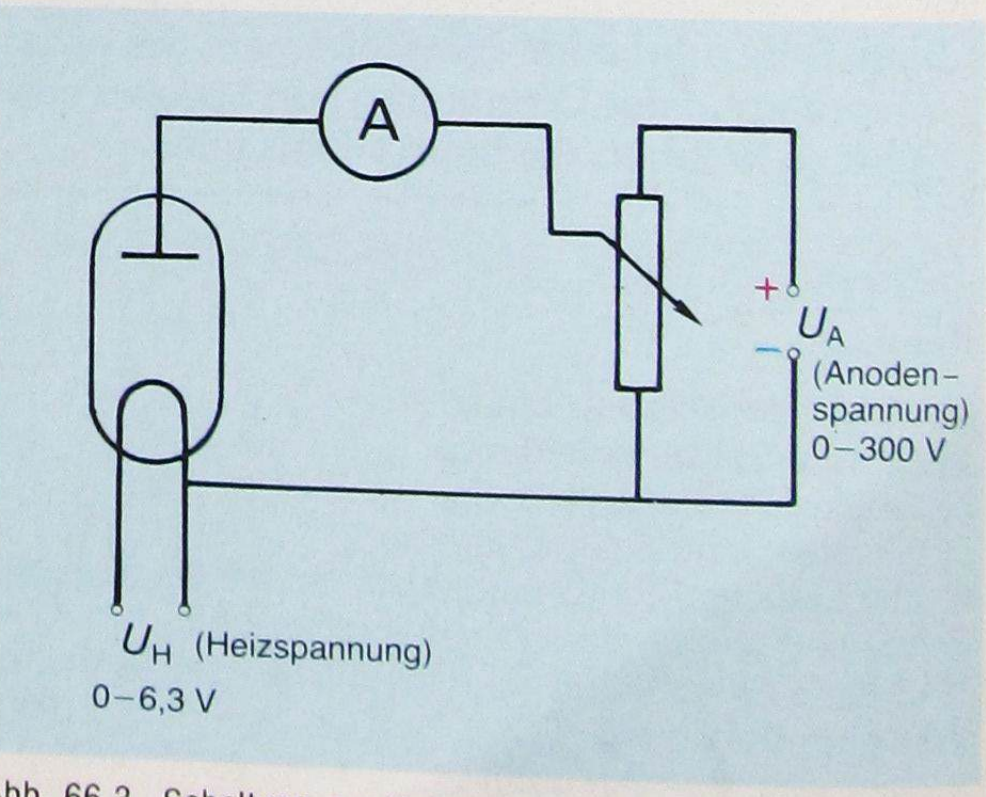


Abb. 66.3. Schaltung zur Untersuchung einer Diode

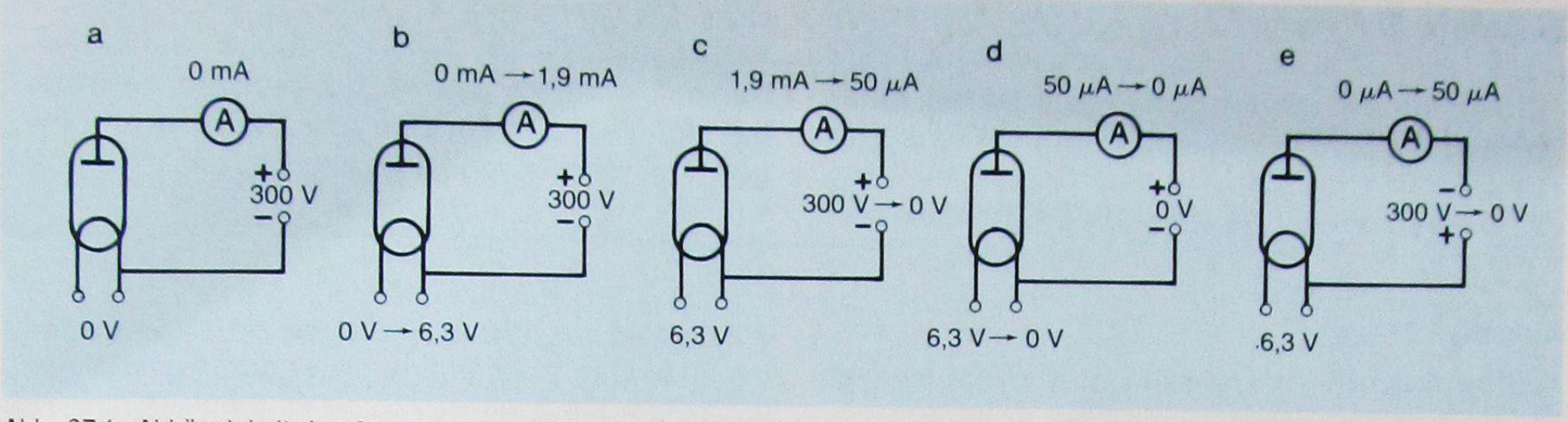


Abb. 67.1. Abhängigkeit des Stroms von der Heizspannung

2. Der Heizstromkreis wird geschlossen und die Heizspannung von 0 V auf 6,3 V hochgeregelt. Der Glühdraht wird durch den Heizstrom bis zur Weißglut (ca. 2700 °C) erhitzt *(Abb. 67.1.b)*.

Ergebnis. Es beginnt ein Strom zu fließen, der mit der Temperatur des Heizdrahtes zunimmt. Bei Weißglut des Drahtes ist I = 1,9 mA.

3. Die Anodenspannung wird auf 0 V herabgeregelt *(Abb. 67.1.c.)*.

Ergebnis. Der Strom bleibt zunächst konstant (bis U_A = 220 V) und nimmt dann mit kleiner werdender Anodenspannung ab. Überraschenderweise fließt auch dann noch ein Strom (I = 50 µA), wenn die Anodenspannung U_A = 0 V ist.

4. Die Heizspannung wird von 6,3 V auf 0 V herabgesetzt. – Die Temperatur des Heizdrahtes sinkt auf Zimmertemperatur ab *(Abb. 67.1.d.)*.

Ergebnis. Der Strom nimmt mit der Temperatur des Heizdrahtes ab und wird schließlich wieder I = 0 µA.

5. Die Anodenspannung wird umgepolt (der Heizfaden ist jetzt Anode, die Metallelektrode Kathode). Die Anodenspannung wird von 300 V auf 0 V herabgeregelt *(Abb. 67.1.e.)*.

Ergebnis. Es fließt zunächst kein Strom. Bei sehr kleiner Anodenspannung beginnt ein Strom zu fließen, der bei U_A = 0 V wieder I = 50 A beträgt.

Deutung der Versuchsergebnisse

Aus einem Metall treten auch ohne Einwirkungen eines äußeren elektrischen Feldes ab einer bestimmten Temperatur elektrisch negativ geladene Ladungsträger aus. Diese müssen Elektronen sein, da auch bei längerem Stromfluss in einer Vakuumröhre keine stoffliche Veränderung der Elektroden feststellbar ist (dies wäre der Fall, wenn der elektrische Strom aus Ionen bestehen würde; *Abb. 67.2.*).

Die Anzahl und die Geschwindigkeit der von der glühenden Metallelektrode ausgesandten (emittierten) Elektronen nehmen mit der Temperatur der Elektrode zu (und hängen von der Art des Metalls ab).
Die Aussendung der Elektronen aus glühenden Metallen bezeichnet man als **Glühemission**, den Vorgang selbst nennt man **glühelektrischen Effekt**.

Deutung des glühelektrischen Effekts

Erhöht sich die Temperatur eines Metalls durch Zufuhr von Energie (Wärme, elektrische Energie des Heizstromes), so nimmt auch die Heftigkeit der thermischen Bewegung der freien Leitungselektronen im Metall zu. Ab einer bestimmten Temperatur besitzen einige Leitungselektronen so große Geschwindigkeiten und damit auch so große kinetische Energien, dass sie die zur Überwindung der in der Metalloberfläche wirksam werdenden rücktreibenden Kräfte erforderliche Austrittsarbeit verrichten und mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit ins Vakuum austreten können (dies gelingt unter einer Milliarde Leitungselektronen i. A. nur einem).

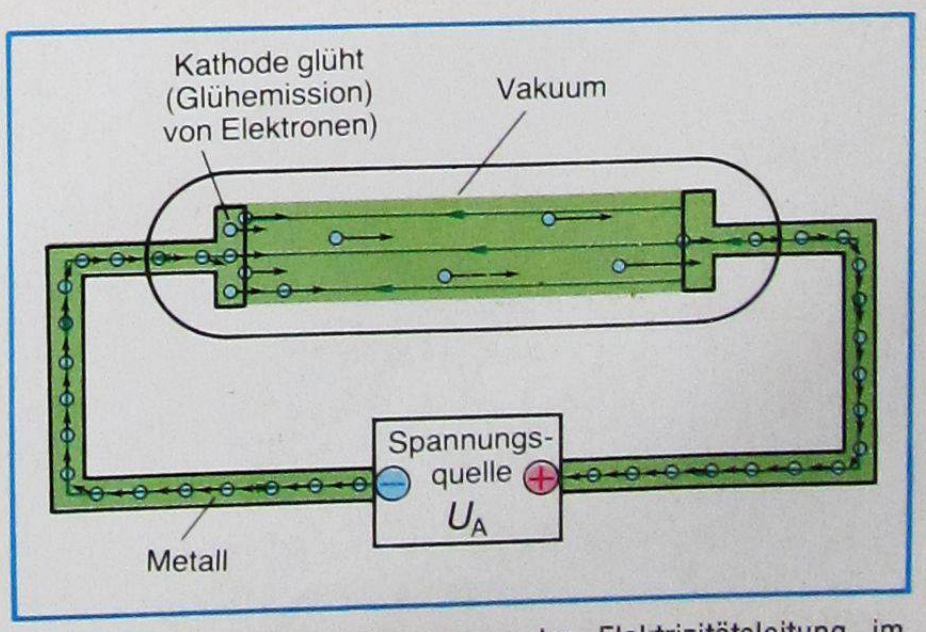


Abb. 67.2. Modellvorstellung von der Elektrizitätsleitung im Vakuum

Zusammenfassung

1. Aus einem glühenden Metall treten Elektronen aus (Glühemission – glühelektrischer Effekt).
2. Die Anzahl der emittierten Elektronen und deren Austrittsgeschwindigkeiten nehmen mit der Temperatur des Metalls zu und hängen von der Art des Metalls ab.

Aufgaben

1. Unter welchen Voraussetzungen fließt im Vakuum ein elektrischer Strom?
2. Beschreibe einen Versuch zum Nachweis des glühelektrischen Effekts.
3. Wovon hängt die Stärke der Glühemission ab?
4. Erkläre das Zustandekommen des glühelektrischen Effekts.
5. Erläutere den Aufbau einer Diode und erkläre, worauf der in ihr stattfindende Stromfluss nur beruhen kann.
6. Zeichne die Schaltskizze für eine Entladungsröhre und gib das Schaltzeichen für eine Diode an.
7. Erkläre den glühelektrischen Effekt mit Hilfe einer Modellvorstellung.
8. Wovon hängt die Stromstärke des in einer Diode stattfindenden Stromflusses ab?

Aus der Geschichte der Physik: Der Edison-Effekt

THOMAS ALVA EDISON (1847 bis 1931) brachte in einer Glühbirne nahe dem heißen Glühfaden einen Draht an. Zu seinem Erstaunen floss Elektrizität vom heißen Glühfaden über die Lücke zum kalten Draht. Dieses Phänomen wird als *Edison-Effekt* bezeichnet. Er fand außerdem heraus, dass der Strom proportional dem Glühgrad des Glühfadens oder der Kerzenstärke der Lampe ist. EDISON wollte diesen Effekt als Indikator für Spannungsänderungen im Lichtnetz nutzen, erkannte aber nicht, dass er nicht mehr weit von der späteren Nutzung als Elektronenröhre entfernt war.
Die Entwicklung zur Elektronenröhre setzten dann der Österreicher ROBERT VON LIEBEN und der Amerikaner LEE DE FOREST im Jahre 1906 unter den Gesichtspunkten der Verstärkung von Telefonsignalen und der Gleichrichtung hochfrequenter Schwingungen fort. Damit war der Weg zur universellen Nutzung des Edison-Effekts als Grundlage der Vakuumelektronik frei.

6.2. Erzeugung und Eigenschaften von Elektronenstrahlen

Durch geeignete Formgebung der Elektroden in einem evakuierten Glaskolben *(Abb. 68.1.a.)* werden die aus der glühenden Kathode emittierten Elektronen im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode so beschleunigt und gebündelt, dass sie mit sehr großen Geschwindigkeiten durch das Loch (den Schlitz) der Anode in den feldfreien Raum hinter der Anode fliegen. Diese schnell bewegten Elektronen bilden den sog. *Elektronenstrahl*, der auch *Kathodenstrahl* genannt wird, weil er aus der Kathode emittiert wird.

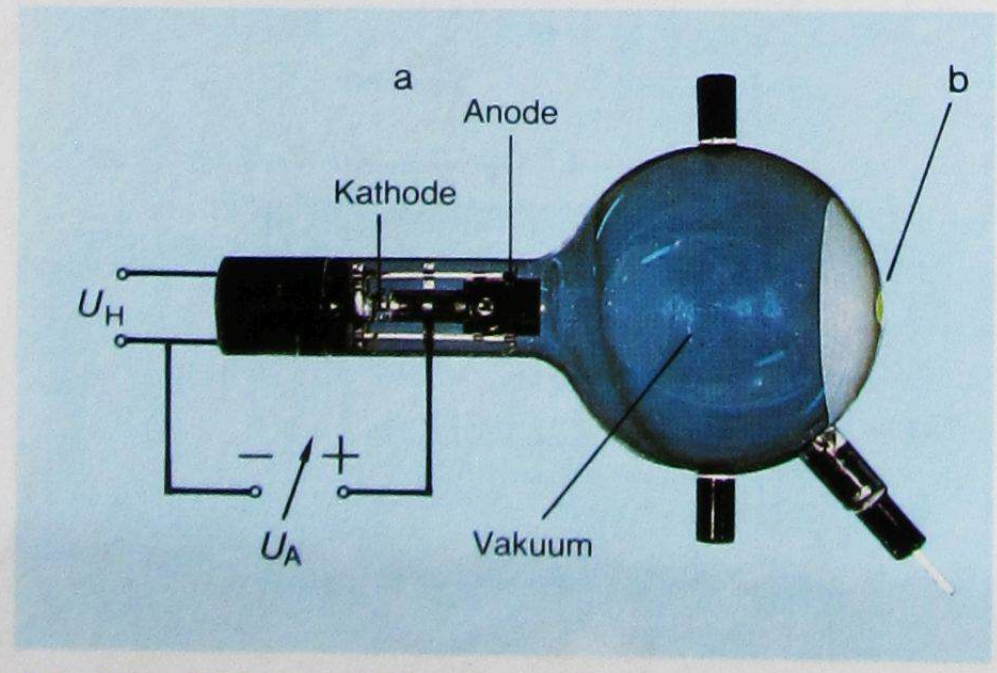


Abb. 68.1. Elektronenstrahlröhre

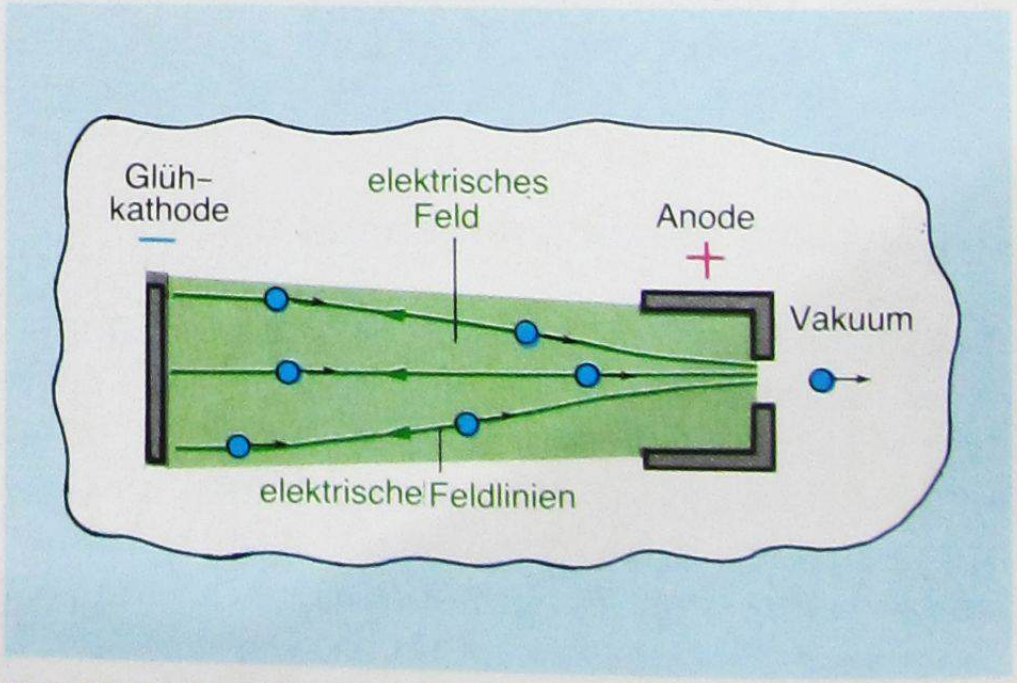


Abb. 68.2. Beschleunigung der Elektronen durch ein elektrisches Feld im Vakuum

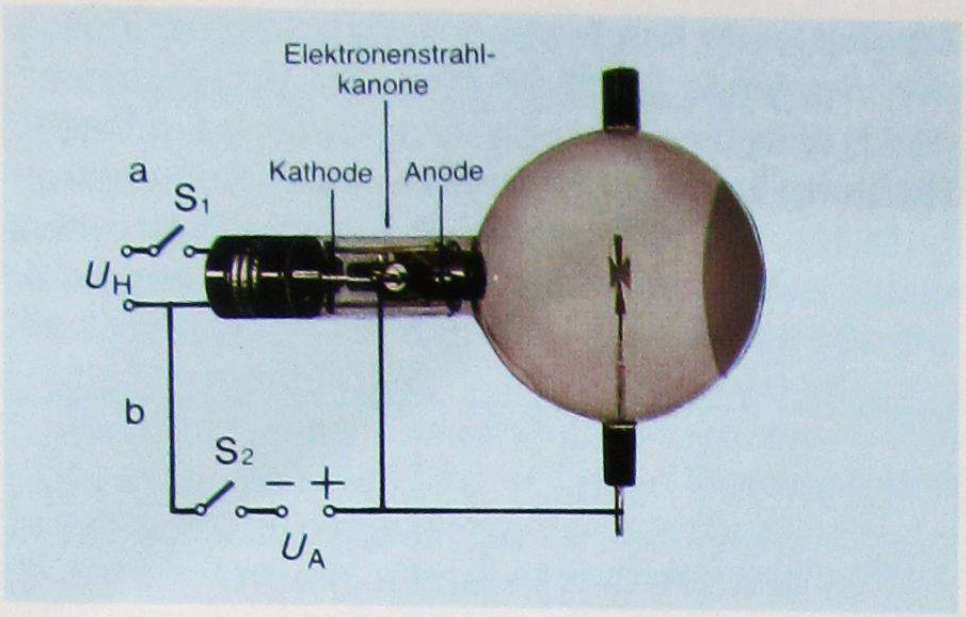


Abb. 69.1. Versuchsaufbau zum Nachweis der geradlinigen Ausbreitung von Elektronenstrahlen im feldfreien Raum

Bestimmte Leuchtstoffe werden beim Auftreffen von Elektronenstrahlen (Aufprall von schnellen Elektronen) zur Aussendung von Licht angeregt *(Abb. 68.1.b.)*. Bei einer Erhöhung der Anodenspannung erzeugt der Elektronenstrahl an der gleichen Stelle des Schirms einen helleren Leuchtfleck. Wir schließen daraus, dass der Aufprall der Elektronen jetzt heftiger erfolgt, d. h., dass die Elektronen mit größeren Geschwindigkeiten am Schirm ankommen. Die Elektronen werden also bei größerer Anodenspannung im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode entlang der elektrischen Feldlinien stärker beschleunigt und erreichen so beim Verlassen des Feldes höhere Geschwindigkeiten *(Abb. 68.2.)*. Die Intensität des Leuchtflecks wird infolge der höheren Aufprallgeschwindigkeit größer.

Ausbreitung der Elektronenstrahlen im feldfreien Raum

Versuch

In einer Elektronenstrahlröhre befindet sich zwischen der „Elektronenkanone", die divergente Elektronenstrahlen aussendet, und dem Leuchtschirm ein Malteserkreuz aus Aluminiumblech *(Abb. 69.1.a.)*. Wir schalten die Röhre entsprechend *Abb. 69.1.b.* und schließen zunächst den Schalter S_1 und dann den Schalter S_2.

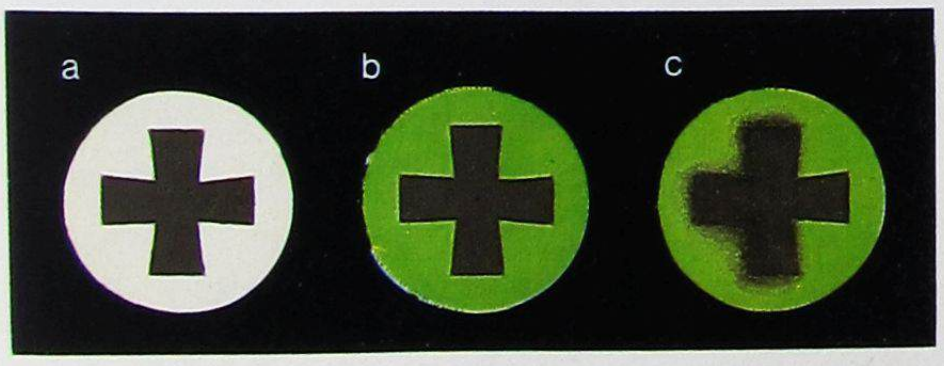


Abb. 69.2. a) Lichtschatten, b) Elektronenstrahlschatten, c) Verzerrung des Elektronenstrahlschattens durch Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder

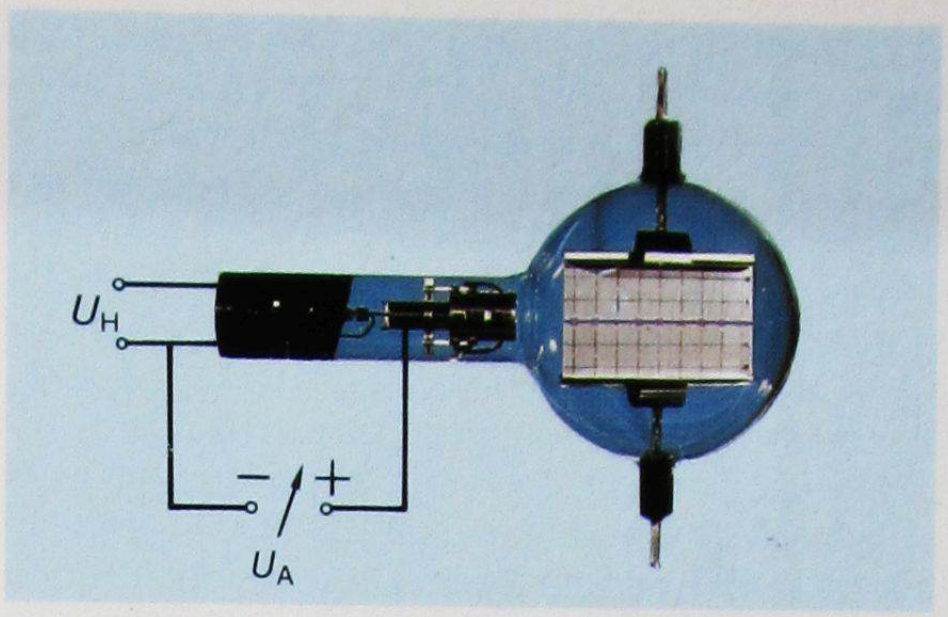


Abb. 69.3. Verlauf eines bandförmigen Elektronenstrahlbündels

Beobachtung. Ist nur der Heizstromkreis geschlossen, so erzeugt das von der glühenden Kathode ausgehende weiße Licht einen scharfen Schatten des Kreuzes *(Abb. 69.2.a.)*.
Nach dem Anlegen der Anodenspannung beobachtet man ein durch die Elektronenstrahlen hervorgerufenes grünes Aufleuchten des Schirmes, wobei ein gleich scharfer, sich mit dem vorhergehenden Lichtschatten genau deckender Elektronenstrahlschatten entsteht *(Abb. 69.2.b.)*.
Nähern wir der Röhre während ihres Betriebes eine elektrisch geladene Kugel oder einen Magneten, so wird der Schatten verzerrt *(Abb. 69.2.c.)*.

Versuch

Der Verlauf eines bandförmigen Elektronenstrahlbündels (erzeugt durch eine Anode mit Querschlitz) kann durch einen schräggestellten Leuchtschirm in der Röhre sichtbar gemacht werden *(Abb. 69.3.)*. An die beiden einander gegenüberliegenden, waagrechten Metallplatten in der Röhre wird eine Gleichspannung gelegt und ein elektrisches Feld erzeugt, das senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Elektronenstrahls gerichtet ist (elektrisches Querfeld).

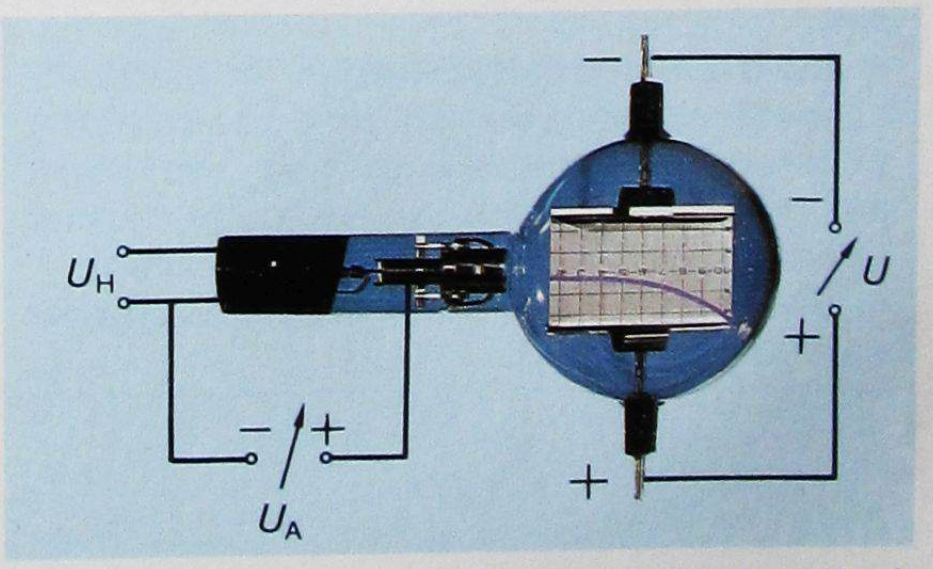


Abb. 69.4. Parabelförmige Ablenkung von Elektronenstrahlen in einem elektrischen Querfeld

Die angelegte Spannung wird vergrößert und dann verkleinert. Nach dem Umpolen der Spannung vergrößern und verkleinern wir diese.
Ergebnis. In einem elektrischen Querfeld werden Elektronenstrahlen in einer gekrümmten (parabelförmigen) Bahn abgelenkt *(Abb. 69.4.)*. Die Ablenkrichtung des Elektronenstrahls hängt von der Richtung des elektrischen Querfeldes ab. Je größer die Spannung zwischen den beiden Ablenkplatten ist, desto stärker wird der Elektronenstrahl abgelenkt. Die Ablenkung des Elektronenstrahls erfolgt wegen der geringen Masse der Elektronen jeder Spannungsänderung praktisch ohne Verzögerung.

Versuch

In einer Elektronenröhre erzeugt ein schmales Elektronenstrahlbündel auf dem Schirm einen kleinen Leuchtfleck *(Abb. 70.1.)*. Wir halten einen Hufeisenmagneten bzw. einen Stabmagneten so an die Röhre, dass magnetische Feldlinien a) quer zum Elektronenstrahl, b) in Richtung des Elektronenstrahls verlaufen.
Ergebnis. Aus der Ablenkung des Leuchtflecks können wir auf die Ablenkung des Elektronenstrahls in einem Magnetfeld schließen *(Abb. 70.1.)*. Für die Ablenkung des Elektronenstrahls im magnetischen Querfeld gilt die *UVW-Regel der linken Hand (Abb. 70.2.)*.

Magnetfelder können auch mit stromdurchflossenen Spulen erzeugt werden. Ihr Vorteil besteht darin, dass die Stärke des Magnetfeldes und seine Richtung in einfacher Weise mit dem Spulenstrom geändert werden können und so der Elektronenstrahl quer zum Magnetfeld beliebig abgelenkt werden kann.

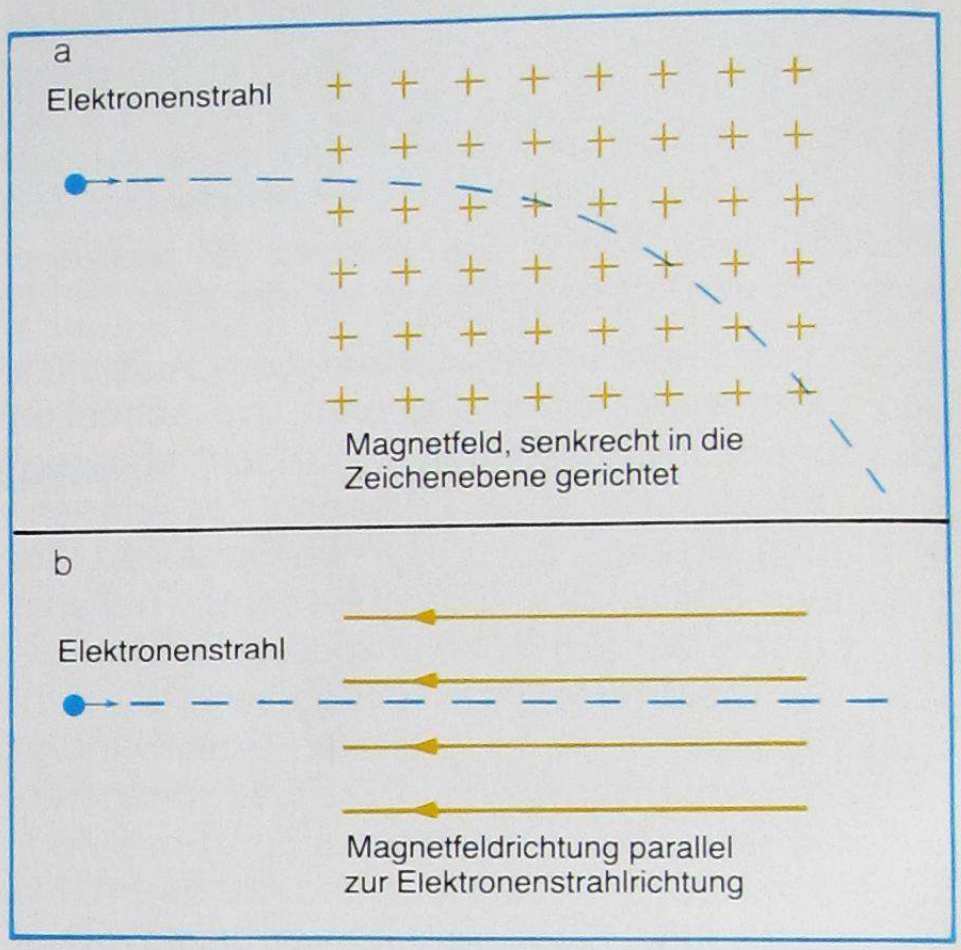


Abb. 70.1. Ablenkung eines Elektronenstrahls
a im magnetischen Querfeld, b im magnetischen Längsfeld

Zusammenfassung

1. Im elektrischen Feld werden die Elektronen entlang der Feldlinien beschleunigt.
2. Elektronenstrahlen breiten sich im feldfreien Raum geradlinig aus und erzeugen in gleicher Weise Schatten wie Lichtstrahlen.
3. Elektronenstrahlen sind durch elektrische und magnetische Felder beeinflussbar.
4. Elektronenstrahlen werden im magnetischen Querfeld senkrecht zur Strahlrichtung (Elektronenstromrichtung) und senkrecht zur Magnetfeldrichtung kreisbogenförmig abgelenkt (UVW-Regel der linken Hand).
5. Die Ablenkung ist umso größer, je stärker das Magnetfeld ist.

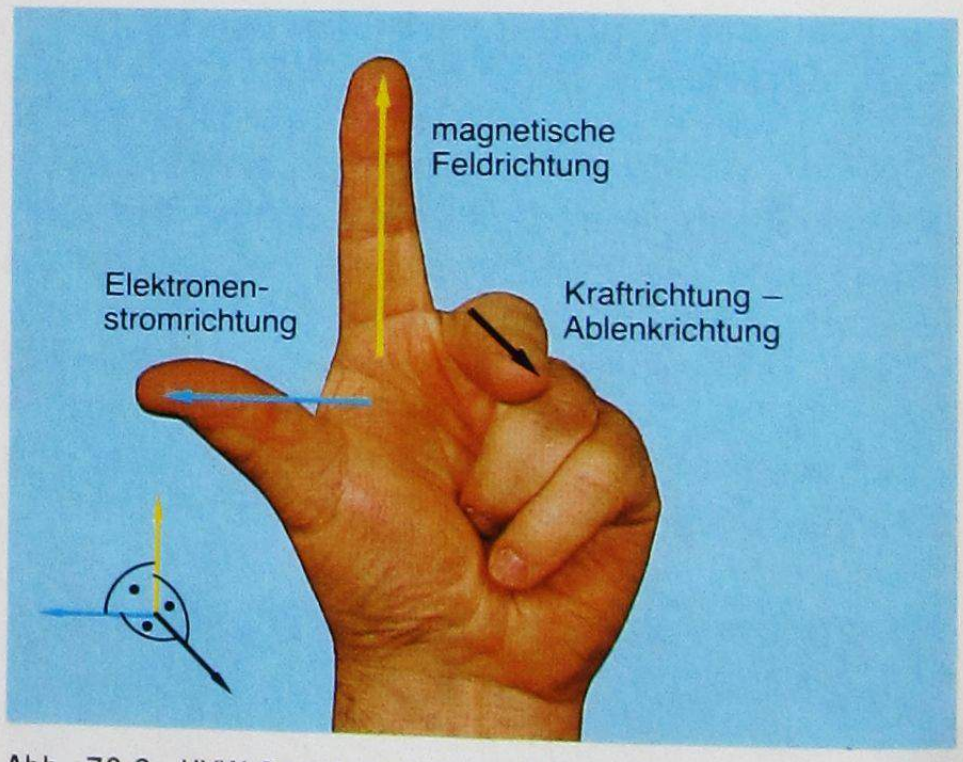


Abb. 70.2. UVW-Regel der linken Hand für die Ablenkung von Elektronenstrahlen im Magnetfeld

6.3. Anwendungen der Elektronenstrahlröhre

6.3.1. Braunsche Röhre

Die Grundlagen für den technischen Einsatz der Elektronenstrahlröhre, z. B. als Hauptbauteil im *Oszilloskop (Kathodenstrahloszillograph, Abb. 71.1.)* oder als *Bildröhre* in jedem Fernsehgerät, schuf der deutsche Physiker FERDINAND BRAUN (1850 bis 1918) mit der nach ihm benannten braunschen Röhre *(Abb. 71.2.)*. Durch die besondere Form der geheizten Kathode K, des gegenüber der Kathode negativ gepolten Zylinders W und der Anode A werden die aus der Kathode emittierten Elektronen im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode so beschleunigt und gebündelt (fokussiert), dass sie durch das Loch der Anode fliegen und im feldfreien Raum zwischen Anode und dem Schirm S ein schmales Elektronenstrahlbündel bilden.
Der Schirm ist mit einem besonderen Leuchtstoff beschichtet, der an der Auftreffstelle des Elektronenstrahls während des Aufpralls der Elektronen aufleuchtet (fluoresziert) und anschließend noch etwas nachleuchtet (phosphoresziert). Zwischen Anode und Schirm befinden sich zwei zueinander senkrecht stehende Metallplattenpaare P_1 und P_2.

Abb. 71.1. Oszilloskop

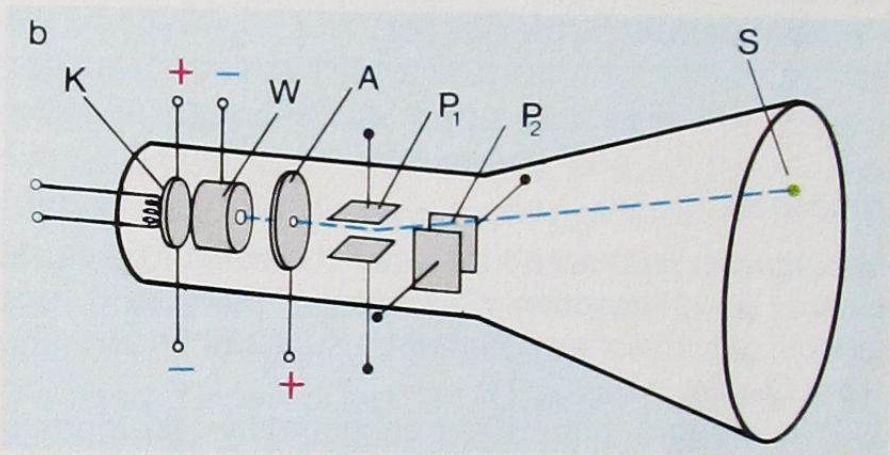


Abb. 71.2. Braunsche Röhre. Bauprinzip (Erklärung im Text)

6.3.2. Oszilloskop

Legt man an das Plattenpaar P_2 eine sog. *Sägezahnkippspannung* U_K *(Abb. 71.3.)*, wird in der Zeit, in der die Spannung von 0 V auf ihren Maximalwert anwächst, der Elektronenstrahl von links nach rechts in horizontaler Richtung abgelenkt. Der Leuchtfleck wandert mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts.
Bei nachfolgend schnellem Abfall der Spannung U_K auf 0 V geht auch der Elektronenstrahl entsprechend schnell auf seine linke Ausgangslage zurück.
Wird nun an das Plattenpaar P_1 eine zu untersuchende Messspannung U_M angelegt *(Abb. 71.3.)*, so wird der Elektronenstrahl gleichzeitig auch in vertikaler Richtung abgelenkt.

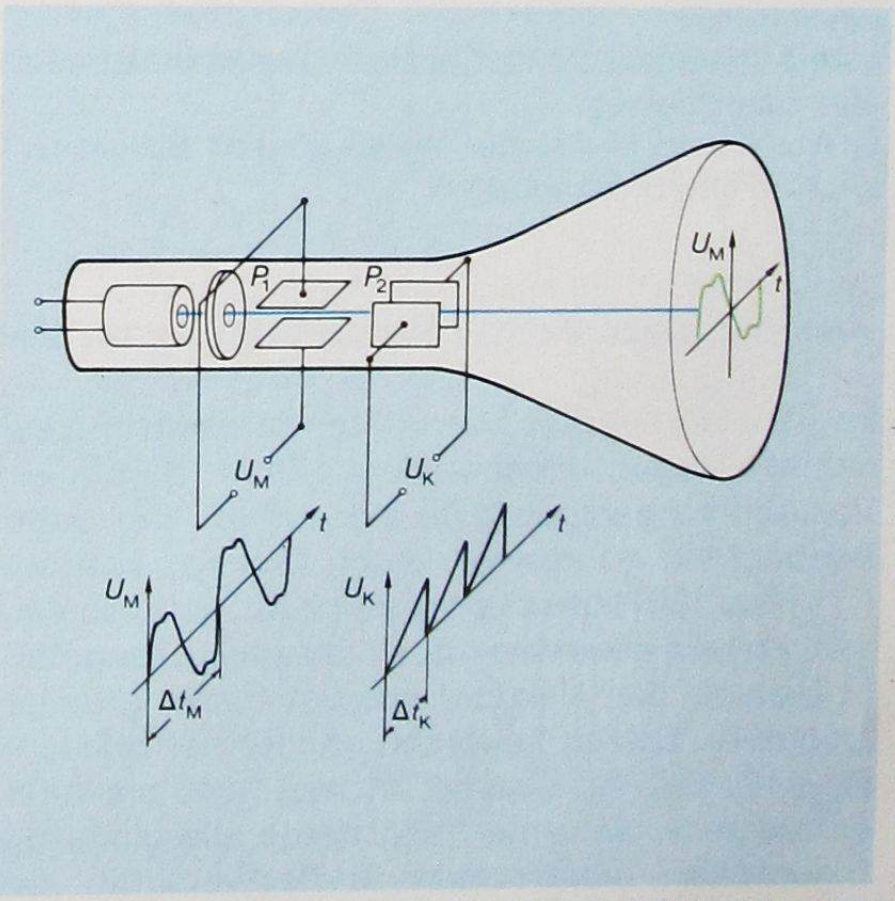


Abb. 71.3. Funktionsprinzip des Oszilloskops (Erklärung im Text)

6.3.3. Fernsehbildröhre (schwarz-weiß)

Bei der Bildröhre eines Fernsehgerätes erfolgt die Elektronenstrahlablenkung durch magnetische Wechselfelder stromdurchflossener Spulen, die

auf den Röhrenhals aufgeschoben sind. Der Elektronenstrahl tastet in 0,04 s die Bildschirmfläche in 625 Einzelzeilen ab, wobei er innerhalb jeder Zeile seine Intensität (durch Änderung der Anodenspannung) bis zu 800-mal entsprechend der Helligkeit der zu übertragenden Bildpunkte ändert *(Abb. 71.2.)*. In jeder Sekunde werden also 25 Bilder mit jeweils bis zu 500 000 einzelnen Bildpunkten ausgestrahlt. Wegen der raschen Folge der („stehenden") Einzelbilder sehen wir, genau wie bei einer Filmwiedergabe, „laufende" Bilder.

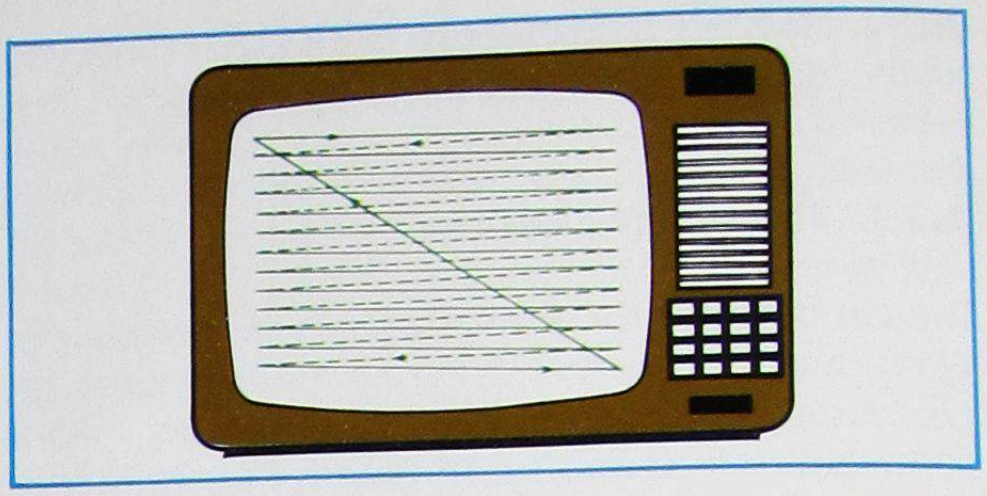


Abb. 72.1. Ablenkung des Elektronenstrahls bei einer Fernsehbildröhre

Zusammenfassung

1. In einer braunschen Röhre werden Elektronen beschleunigt und gebündelt, so dass sich ein schmaler Elektronenstrahl bildet.
2. Dieser kann durch elektrisch geladene Metallplatten oder durch magnetische Felder stromdurchflossener Spulen abgelenkt werden und ruft beim Auftreffen auf einen Schirm einen Leuchtfleck hervor.
3. Braunsche Röhren werden als Bildröhren in Fernsehgeräten und in Oszilloskopen eingesetzt.
4. Bei einem Oszilloskop wird eine zu untersuchende Spannung mit einer Sägezahnkippspannung überlagert, so dass der Elektronenstrahl den zeitlichen Spannungsverlauf auf den Bildschirm zeichnet.

Aufgaben

1. Skizziere und beschreibe den Leitungsvorgang in einem geschlossenen Stromkreis, bestehend aus einem galvanischen Element, Kupferleitungen und einer Diode.
2. Wie erzeugt man Elektronenstrahlen (Kathodenstrahlen)?
3. Beschreibe einen Versuch zum Nachweis der geradlinigen Ausbreitung von Elektronenstrahlen im feldfreien Raum.
4. Welche Eigenschaften besitzen Elektronenstrahlen (Kathodenstrahlen)?
5. Womit und in welcher Weise können Elektronenstrahlen abgelenkt werden?
6. Erläutere die UVW-Regel der linken Hand für die Elektronenstrahlablenkung im Magnetfeld.
7. Ein Elektronenstrahl gelangt
a) in ein homogenes elektrisches Feld,
b) in ein homogenes magnetisches Feld.
Skizziere und beschreibe mögliche Sonderfälle.
8. Skizziere das Bauprinzip einer braunschen Röhre und erläutere ihre Funktionsweise.
9. Beschreibe das Funktionsprinzip eines Oszilloskops.
10. Beschreibe die Entstehung des Bildes bei einer Fernsehbildröhre (schwarz-weiß).

Aus der Geschichte: Stromleitung im Vakuum – Grundlage für die Elektronik

Im 19. Jahrhundert versuchten Wissenschaftler immer wieder, elektrischen Strom durch ein Vakuum zu schicken, da sie hofften, ihn dabei beobachten zu können. Auch MICHAEL FARADAY (1791 bis 1867) beschäftigte sich mit solchen Versuchen und bemerkte dabei, dass das Glasgefäß, in dem er das Vakuum erzeugt hatte, grünlich leuchtete. Dieses Leuchten nannte der britische Physiker GEORGE GABRIEL STOKES (1819 bis 1903) *Fluoreszenz*, worunter man heute allerdings die Eigenschaft bestimmter Stoffe versteht, bei Bestrahlung zu leuchten.

Mit der Erfindung des Deutschen JOHANN HEINRICH WILHELM GEISSLER (1815 bis 1879) war es möglich geworden, Vakuumröhren von hoher Qualität, die sog. *geißlerschen Röhren*, herzustellen.
Mit Hilfe einer solchen Röhre konnte der deutsche Physiker JULIUS PLÜCKER (1801 bis 1868) die Fluoreszenz beobachten und beschreiben. Dabei stellte er fest, dass sich die Lage der Fluoreszenzerscheinungen unter dem Einfluss eines elektromagnetischen Feldes verschob. Damit zeigte sich, dass an den Vorgängen in der Röhre elektrische Ladungen beteiligt sein mussten.

Die Versuche von PLÜCKER wurden von dem deutschen Physiker EUGEN GOLDSTEIN (1850 bis 1930) wiederholt, der dabei beobachtete, dass die Fluoreszenz durch das Auftreffen eines Strahlenbündels entsteht, das von der Kathode ausgeht. Er nannte die Strahlen deshalb *Kathodenstrahlen.* Damit war die Hypothese von BENJAMIN FRANKLIN, der vermutet hatte, die Elektrizität fließe vom elektrisch positiven zum negativen Pol, widerlegt.

Der britische Physiker WILLIAM CROOKES (1832 bis 1919) entwickelte im Jahr 1875 bessere Vakuumröhren, mit deren Hilfe er zeigte, dass sich die Kathodenstrahlen geradlinig ausbreiten, Schatten werfen und sogar in der Lage sind, ein kleines Rad zu drehen. Auch die Ablenkbarkeit durch einen Magneten entdeckte er und schloss daraus, dass die Kathodenstrahlen aus elektrisch negativ geladenen Teilchen bestehen.

Diesen Nachweis, dass Kathodenstrahlen aus elektrisch negativ geladenen Teilchen bestehen, erbrachte der französische Physiker JEAN-BAPTISTE PERRIN (1870 bis 1942), der zeigte, dass sich ein mit Kathodenstrahlen bestrahlter Zylinder elektrisch negativ auflädt. Endgültig alle Zweifel räumte dann der britische Physiker JOSEPH JOHN THOMSON (1856 bis 1940) aus, dem im Jahre 1897 der Nachweis gelang, dass Kathodenstrahlen nicht nur durch ein magnetisches, sondern auch durch ein elektrisches Feld abgelenkt werden können. Er nannte die elektrisch negativ geladenen Teilchen *Elektronen.*

Der deutsche Physiker KARL FERDINAND BRAUN (1850 bis 1918) entwickelte im Jahr 1897 die Kathodenstrahlröhre weiter und erreichte, dass der grüne Fluoreszenzfleck seine Position unter Einfluss eines sich ändernden Magnetfeldes, das von einem sich ändernden Strom hervorgerufen wird, synchron ändert. Er baute damit das erste *Oszilloskop* und den Vorläufer der heutigen *Fernsehröhre.*

Eine weitere Anwendung entdeckte der britische Elektroingenieur JOHN AMBROSE FLEMING (1849 bis 1945), der an eine Kathodenstrahlröhre eine Wechselspannung anlegte. Nur wenn der Heizdraht mit der elektrisch negativ geladenen Elektrode verbunden war, floss ein Strom, im umgekehrten Fall nicht. Die Röhre funktionierte somit als *Gleichrichter* und machte aus einem Wechselstrom einen Gleichstrom, weil sie Strom nur in einer Richtung durchließ.

Fernsehen als Anwendung der braunschen Röhre existierte zunächst 20 Jahre im Labor, ehe ab dem Jahr 1947 in den USA Fernsehapparate für private Haushalte hergestellt wurden. Zunächst waren die Bildschirme klein, die Bilder unscharf, und es gab auch nur wenige Programme. Aber bereits nach einigen Jahren hatte sich das Fernsehen seinen Stellenwert als beliebte Freizeitgestaltung erobert, und durch eine immer größer werdende Massenproduktion wurde es vom Luxusartikel zum täglichen Gebrauchsgegenstand.

Die ersten Methoden zur Übermittlung farbiger Fernsehbilder wurden bereits im Jahr 1940 durch den ungarisch-amerikanischen Ingenieur PETER CARL GOLDMARK (1906 bis 1977) entwickelt, konnten sich jedoch nicht durchsetzen. Erst 14 Jahre später hatten dann effektivere Methoden mehr Erfolg.

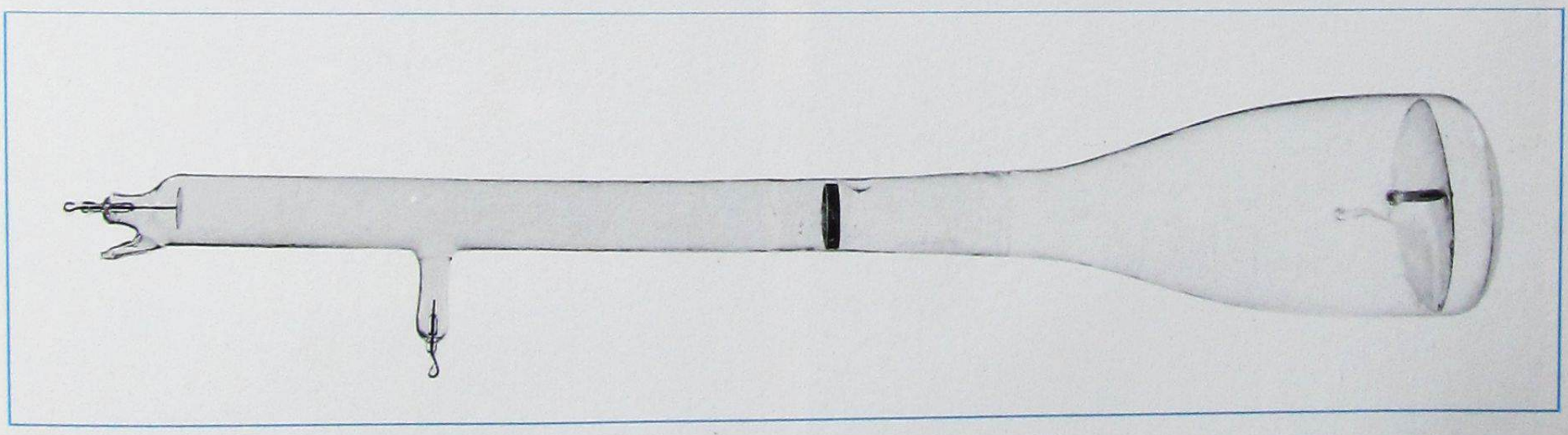


Abb. 73.1. Kathodenstrahlröhre von FERDINAND BRAUN

7. Grundlagen der Atom- und Kernphysik

7.1. Atome und ihr Aufbau

Aus dem Chemieunterricht der 9. Jahrgangsstufe wissen wir, dass Atome die kleinsten Bausteine der heute bekannten 112 chemischen Elemente sind (92 davon kommen in der Natur vor, 15 können künstlich hergestellt werden). Es gibt ebenso viele chemisch verschiedene Atomarten wie es verschiedene Elemente gibt.
Atommodelle wurden entwickelt, um die physikalischen und die chemischen Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten beschreiben und erklären zu können. Für unsere Darstellung eignet sich das bereits im Jahr 1900 von E. RUTHERFORD und N. BOHR entwickelte Atommodell *(Abb. 74.2.)*.
Jedes Atom besteht danach aus einem **Atomkern** und einer **Elektronenhülle**. Der Atomkern bildet den Mittelpunkt des Atoms, ist elektrisch positiv geladen und besitzt nahezu die gesamte Masse des Atoms; sein Durchmesser liegt in der Größenordnung 10^{-15} m. Die Elektronenhülle wird aus elektisch negativ geladenen Elektronen gebildet, die sich nach Art von Planeten auf bestimmten Bahnen um den Kern bewegen. Der Durchmesser der Elektronenhülle und damit der Durchmesser des Atoms liegt in der Größenordnung 10^{-10} m. Der Raum zwischen Atomkern und Elektronenhülle ist leer *(Abb. 74.2.)*.
Alle Atomkerne (ausgenommen der des Wasserstoff-Atoms) bestehen aus zwei verschiedenen Kernbausteinen (**Nukleonen**[1]). Dies hat im Jahre 1932 der deutsche Physiker WERNER HEISENBERG postuliert. Nach dem von ihm vorgeschlagenen Modell enthält ein Atomkern **Protonen**, elektrisch positiv geladene Teilchen (mit der positiven Elementarladung $e_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C), und **Neutronen**, elektrisch neutrale Teilchen (daher ihr Name). Ist das Atom nach außen hin elektrisch neutral, so haben Kern und Hülle entgegengesetzt gleiche elektrische Ladung.

Es gilt dann die Regel:

Zahl der Protonen im Kern
= Zahl der Elektronen in der Hülle.

Wir wissen aus dem Chemieunterricht, dass jedes Element im Periodensystem einen bestimmten Platz hat, der durch die **Ordnungszahl** der Elemente festgelegt ist.

Beispiele

Wasserstoff (H): 1; Helium (He): 2; Sauerstoff (0): 8; Uran (U): 92.

Die Ordnungszahl gibt die Zahl der Protonen im Kern (und damit auch die Zahl der Elektronen in der Hülle) an:

Ordnungszahl = Protonenzahl
= Kernladungszahl

[1] von *nucleus* (lat.) = Kern

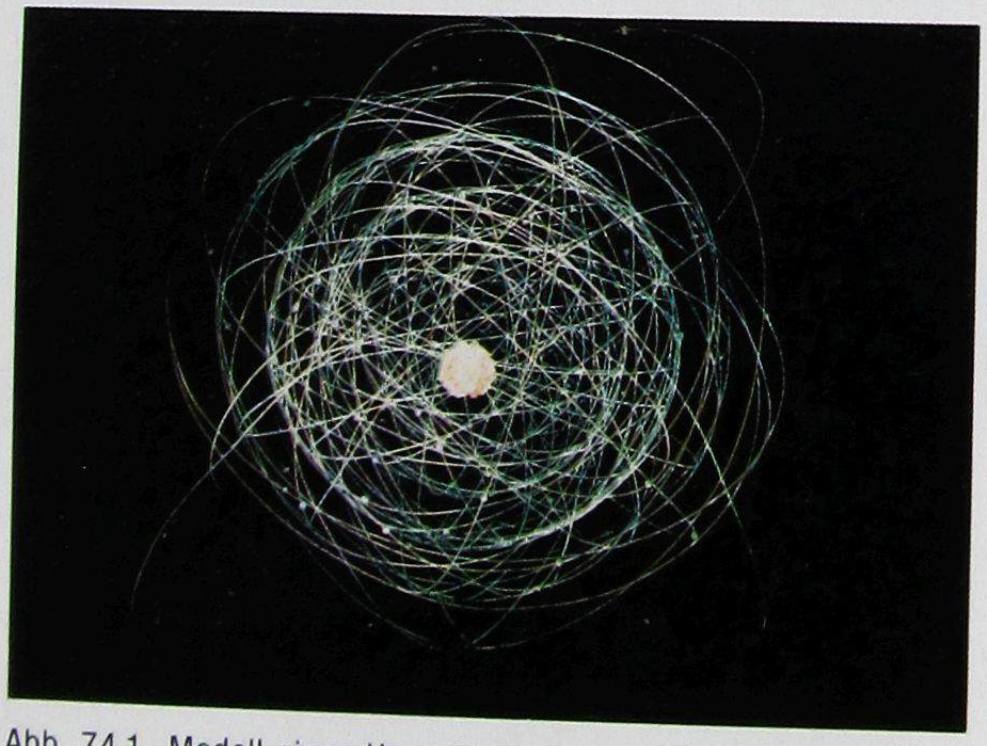


Abb. 74.1. Modell eines Uran-Atoms

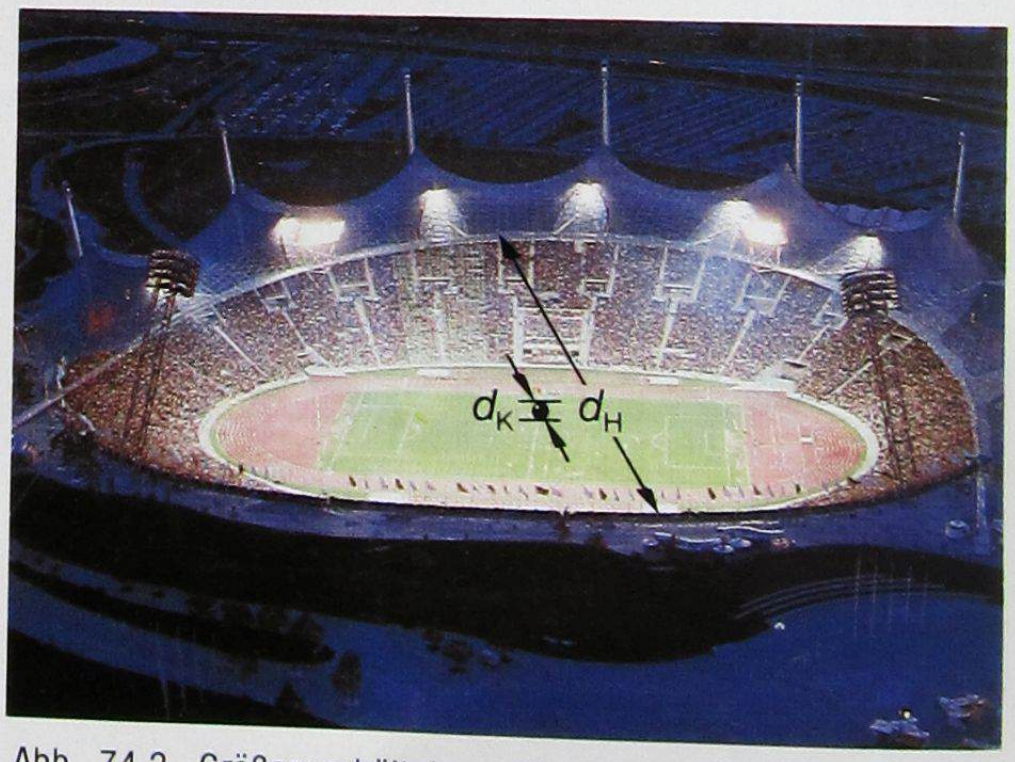


Abb. 74.2. Größenverhältnisse: Für das Verhältnis der Durchmesser von Atomkern und -hülle gilt:
$d_K : d_H = 1 : 100\,000$; dies entspricht etwa dem Verhältnis des Durchmessers einer Erbse zum Durchmesser des Olympiastadions in München.

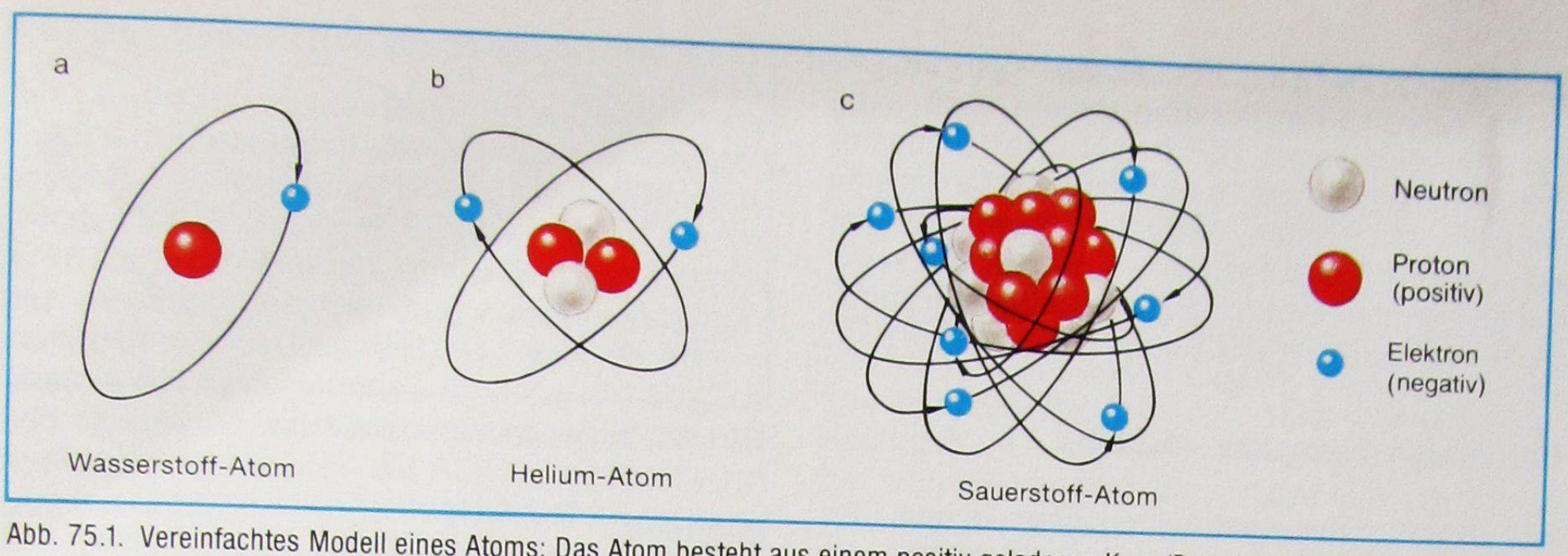


Abb. 75.1. Vereinfachtes Modell eines Atoms: Das Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern (Protonen und Neutronen) und einer negativ geladenen Hülle (Elektronen).

Am einfachsten ist das Wasserstoff-Atom aufgebaut. Es besitzt im Kern nur ein Proton und in der Hülle ein Elektron *(Abb. 75.1.a.)*. Der Kern des Helium-Atoms enthält neben 2 Protonen noch 2 Neutronen; er wird von 2 Elektronen umkreist *(Abb. 75.1.b.)*. Beim Sauerstoff-Atom hat der Kern bereits 8 Protonen und 8 Neutronen, in der Hülle befinden sich 8 Elektronen *(Abb. 75.1.c.)*.

Proton und Neutron haben etwa die gleiche Masse: $m_P = 1{,}6723 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_N = 1{,}6747 \cdot 10^{-27}$ kg

Die **Nukleonenzahl** eines Atoms ist die Summe aus der Zahl der Protonen und der Zahl der Neutronen im Kern. Sie wurde früher auch als **Massenzahl** bezeichnet, da sie annähernd dem Zahlenwert der Masse des Atoms entspricht. Zur symbolischen Darstellung des Aufbaus eines bestimmten Atoms schreibt man zum chemischen Symbol des betreffenden Elements noch die Ordnungszahl (unten links) und die Nukleonenzahl (oben links) dazu.

Die Schreibweise $^{16}_{8}O$ bedeutet, dass das Sauerstoff-Atom die Protonenzahl 8, also 8 Protonen im Kern (und 8 Elektronen in der Hülle) und die Nukleonenzahl 16 hat. Die Differenz aus der Nukleonenzahl 16 und der Protonenzahl 8 ergibt die Anzahl der Neutronen im Kern: 16 – 8 = 8.

Allgemein gilt:

Symbol des chem. Elements

Nukleonenzahl (Zahl der Protonen + Zahl der Neutronen) — **A**

Ordnungszahl = Kernladungszahl (Zahl der Protonen) — **Z**

X

Abb. 75.2. zeigt den Aufbau von Atomkernen der Elemente der ersten zwei Perioden des Periodensystems. Für das Proton wurde das Symbol $^{1}_{1}p$ (1 positive Ladung; Nukleonenzahl 1), für das Neutron das Symbol $^{1}_{0}n$ (keine Ladung, Nukleonenzahl 1) eingeführt.

Wir wissen, dass sich elektrisch positiv geladene Körper gegenseitig abstoßen. Warum fliegen dann Atomkerne, in denen mehrere Protonen eng zusammengepackt sind, nicht auseinander?

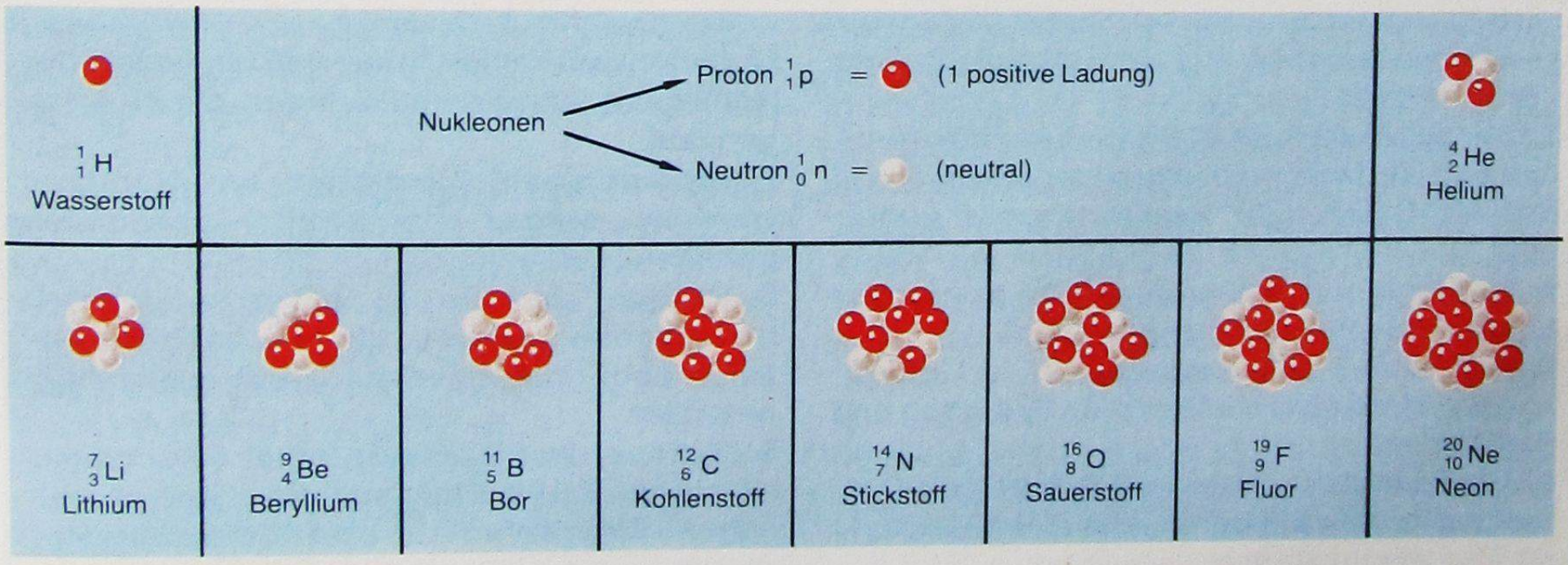


Abb. 75.2. Aufbau von Atomkernen der ersten zwei Perioden des Periodensystems

Es hat einige Zeit gedauert, bis die Physiker diese Frage beantworten konnten. Heute weiß man, dass die Nukleonen durch **Kernkräfte** zusammengehalten werden. Es handelt sich hier um eine neue Art von Kräften, deren Reichweite auf den atomaren Größenbereich (10^{-15} m) beschränkt ist. Die Entstehung und die Eigenschaften der Kernkräfte werden auch heute noch intensiv erforscht.

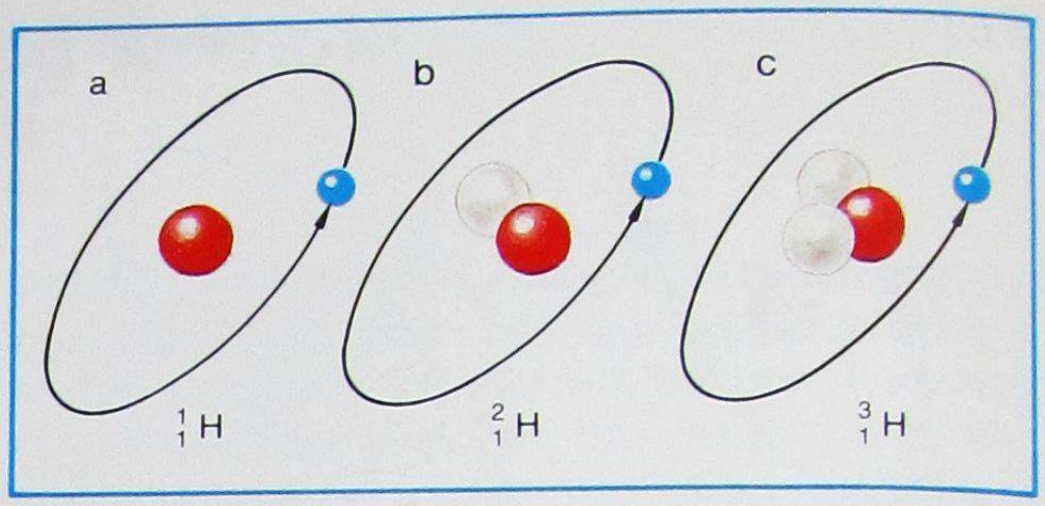


Abb. 76.1. Isotope des Wasserstoff-Atoms

Chemische Elemente – Isotope

Alle Atome eines bestimmten chemischen Elements haben in der Hülle die gleiche Anzahl von Elektronen; sie besitzen deshalb im Kern auch eine gleiche Anzahl von Protonen. Die Zahl der Neutronen im Kern der einzelnen Atome kann jedoch unterschiedlich groß sein, ohne dass dies einen Einfluss auf das chemische Verhalten der Atome hat.

Man konnte feststellen, dass es z. B. zwei verschiedene Arten von Chlor-Atomen gibt, nämlich Chlor-Atome mit der Nukleonenzahl 35 und mit der Nukleonenzahl 37, $^{35}_{17}Cl$ und $^{37}_{17}Cl$. Man nennt Atome mit gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl **Isotope** (d. h. am gleichen Platz im Periodensystem stehende Elemente).

Chlor besteht zu 75 % aus $^{35}_{17}Cl$-Atomen und zu 25 % aus $^{37}_{17}Cl$-Atomen. Das Isotop [$^{37}_{17}Cl$]-Chlor[1] besitzt 2 Neutronen mehr als das Isotop [$^{35}_{17}Cl$]-Chlor. Chemisch unterscheiden sich diese Isotope nicht, ihre physikalischen Eigenschaften sind dagegen verschieden.

[1] lies: Chlor 17

Beispiele

1. Von Wasserstoff kennt man 3 Isotope: normalen Wasserstoff $^{1}_{1}H$ *(Abb. 76.1.a.)*; schweren Wasserstoff $^{2}_{1}H$ oder *Deuterium (Abb. 76.1.b.)*; überschweren Wasserstoff oder *Tritium* $^{3}_{1}H$ *(Abb. 76.1.c.)*.
Der Kern eines normalen Wasserstoff-Atoms besteht aus einem Proton, im Deuterium-Atom kommt zum Proton noch ein Neutron hinzu. Beim Tritium-Atom besteht der Kern aus einem Proton und zwei Neutronen. Tritium ist ein „künstliches" Isotop und kommt in der Natur nicht vor; es kann nur im Labor hergestellt werden.
2. Uran, das für die Freisetzung der Kernenergie eine große Rolle spielt, enthält drei in der Natur vorkommende Isotope:

$^{238}_{92}U$ (99,274 %), $^{235}_{92}U$ (0,720 %) und
$^{234}_{92}U$ (0,006 %).

Jeder Kern eines Uran-Atoms enthält 92 Protonen; die Kerne der Uran-Isotope haben 146 bzw. 143 bzw. 142 Neutronen.

Aufgabe

Erläutere die Symbole $^{1}_{1}H$; $^{4}_{2}He$; $^{12}_{6}C$; $^{35}_{17}Cl$; $^{238}_{92}U$.

Zusammenfassung

1. Atome bestehen aus dem Atomkern und der Atomhülle.
2. Der Atomkern ist elektrisch positiv geladen und wird von positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen aufgebaut.
3. In der Atomhülle kreisen Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Kern.
4. Atome sind elektrisch neutral und enthalten somit die gleiche Anzahl an Protonen und Elektronen.
5. Die Anzahl der Protonen bestimmt die Ordnungszahl des Elements, also seine Stellung im Periodensystem.
6. Die Anzahl der Protonen und die Anzahl der Neutronen ergeben zusammen die Nukleonenzahl.
7. Protonen und Neutronen im Atomkern werden durch Kernkräfte zusammen gehalten.
8. Isotope sind Atome eines bestimmten chemischen Elements, die gleiche Protonenzahl, aber verschiedene Neutronenzahlen besitzen.
9. Isotope eines Elements haben verschiedene physikalische Eigenschaften; ihre chemischen Eigenschaften sind normalerweise gleich.

Aus der Geschichte der Physik: Die Entstehung der Atomtheorie

Um 440 v. CHR. stellte der Grieche DEMOKRIT die Theorie auf, dass sich alle Materie aus winzigen unsichtbaren Teilchen, die unteilbar sind, zusammensetzt. Der englische Chemiker JOHN DALTON (1766 bis 1844) fasste im Jahr 1803 alle Argumente des atomistischen Denkens zusammen. Dabei konnte er sich im Gegensatz zu DEMOKRIT, dessen Theorie auf Spekulationen beruhte, auf sorgfältige chemische Beobachtung stützen. DEMOKRIT hatte noch behauptet, die Atome unterschieden sich in der Form, DALTON dagegen, als Kind einer Zeit, in der Messen und Wiegen immer wichtiger wurde, behauptete, dass sie sich im Gewicht (in der Masse) unterscheiden und führte deshalb auch den Begriff des Atomgewichts (der Atommasse) ein. Da er aber annahm, dass z. B. bei Verbindungen jeweils nur ein Atom eines Elements am Aufbau eines Moleküls beteiligt ist, waren seine errechneten Werte nicht immer richtig.

Nach DALTON arbeiteten die Chemiker an der Bestimmung der Atommassen und stellten fest, dass das Wasserstoff-Atom die geringste Masse aller Atome besitzt und die übrigen Atommassen ganzzahlige Vielfache der Masse des Wasserstoff-Atoms darstellen. Der englische Chemiker WILLIAM PROUT nahm deshalb im Jahr 1815 an, dass das Wasserstoff-Atom ein grundlegender Baustein sei und alle anderen Atome aus einer unterschiedlichen Anzahl von Wasserstoff-Atomen aufgebaut sind. Diese sogenannte *proutsche Hypothese* wurde abgelehnt, als man Atommassen bestimmte, die keine genauen ganzzahligen Vielfachen der Atommasse eines Wasserstoff-Atoms sind. Er kam mit seiner Vermutung der Wahrheit schon recht nahe, wenn man bedenkt, dass die Masse des Atoms von der Protonen- und Neutronenzahl bestimmt wird und die Masse eines Wasserstoff-Atoms der Masse eines Protons entspricht (die Masse der Elektronen ist demgegenüber vernachlässigbar klein). Allerdings ist der Aufbau wesentlich komplizierter, als PROUT annahm.

Einen – wohl erst für spätere Zeiten – wichtigen Beweis für die Existenz von Atomen lieferte im Jahr 1827 der britische Botaniker ROBERT BROWN (1773 bis 1858), der nachwies, dass die Teilchen eines Stoffes unregelmäßige Bewegungen ausführen. Dieses Phänomen wurde ihm zu Ehren *brownsche Bewegung* genannt.

Im Jahr 1897 entdeckte der britische Physiker THOMSON (siehe *S. 73*), dass Kathodenstrahlen aus negativ geladenen Elementarladungen, den Elektronen, bestehen.

Alle diese Nachweise waren Schritte auf dem Weg zu einem Atommodell, das im Jahr 1911 der britische Physiker ERNEST RUTHERFORD (1871 bis 1937) aufstellte. Bereits im Jahr 1897 hatte er die elektrisch positiv geladenen, radioaktiven Strahlen erkannt und sie als *Alphastrahlen* im Gegensatz zu den elektrisch negativ geladenen *Betastrahlen* bezeichnet. Im Jahr 1906 gelang es ihm, nachdem man inzwischen wusste, dass es sich bei den Betastrahlen um Ströme von Elektronen handelt, die Struktur der Alphastrahlung zu entschlüsseln. Er erkannte, dass die Partikel dieser Strahlung einem Helium-Atomkern ähnlich sind. Als er im Jahr 1908 eine nur 0,00005 cm dicke Goldfolie mit Alphateilchen beschoss und die meisten Teilchen bis auf wenige diese Folie unbeeinflusst passierten, schloss er daraus, dass ein Teil des Atoms über eine beträchtliche Masse verfügen muss und dieser Teil einen sehr kleinen Teil der Gesamtheit ausmacht. Bis zum Jahr 1911 hatte er genügend Beweise gesammelt, um sein Atommodell vorzulegen. Danach ist die Masse des Atoms in einem kleinen Teil des Gesamtatoms, im elektrisch positiv geladenen Atomkern, konzentriert. Der größte Teil des Atoms, die Elektronenhülle, ist praktisch leer. Sie enthält eine elektrisch negative Ladung, um den elektrisch positiven Kern zu neutralisieren. Das Atom ist nach außen hin elektrisch neutral.

Dieses einfache Atommodell wurde vom dänischen Physiker NIELS HENDRIK DAVID BOHR (1855 bis 1962) weiterentwickelt, so dass die Umlaufbahnen der Elektronen beschrieben und Phänomene wie Energieabgabe in Form von Strahlung geklärt werden konnten.

Im Jahr 1914 entdeckte RUTHERFORD, dass es keine kleinere elektrisch positive Ladung als die des Kerns eines Wasserstoff-Atoms gibt und nannte das Teilchen mit der kleinsten elektrisch positiven Elementarladung **Proton**. Es dauerte dann aber noch weitere 18 Jahre, bis im Jahr 1932 der englische Physiker JAMES CHADWICK (1891 bis 1974) das **Neutron** entdeckte.

Durch Neutronenbeschuss von Atomkernen stellte der italienische Physiker ENRICO FERMI (1901 bis 1954) fest, dass sich beim Zerfall instabiler Atomkerne ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt. Damit konnte ein Atommodell aufgestellt werden, das unserem heutigen in den Grundzügen entspricht und das in der Folgezeit immer weiter verfeinert wurde. Auch heute noch werden Elementarteilchen untersucht, um den Aufbau der Materie zu entschlüsseln.

7.2. Radioaktive Strahlung

7.2.1. Begriff der radioaktiven Strahlung

Im Jahre 1896 entdeckte der französische Physiker HENRI BECQUEREL *(Abb. 78.1.)*, dass Uransalze von sich aus ohne jedes äußere Zutun eine bis dahin unbekannte Strahlung aussenden.
Zwei Jahre später gelang es dem französischen Ehepaar MARIE und PIERRE CURIE *(Abb. 83.2.)*, aus Pechblende, einem Uranerz, zwei neue, besonders stark strahlende Elemente zu isolieren; sie nannten diese Elemente *Polonium* (Po) und *Radium* (Ra).
Für die besondere Eigenschaft der strahlenden Substanzen wurden neue Wörter geprägt: **radioaktiv** und **Radioaktivität**. Die **radioaktive Strahlung**, die von radioaktiven Elementen ausgesandt wird, konnte zunächst nur auf Grund ihrer Wirkungen erkannt werden: sie schwärzt Photoplatten, sie ionisiert Gase und macht sie dadurch leitfähig (siehe Kap. 5.4., S. 59 f.) und sie bringt bestimmte Stoffe zum Aufleuchten *(Szintillation)*.
Zu dieser Zeit untersuchte man in der Physik auch den Aufbau der Atome und entdeckte, dass sie aus einer Hülle, die Elektronen enthält, und einem Kern bestehen, in dem sich die elektrisch positiv geladenen Protonen und die elektrisch neutralen Neutronen befinden. Dieses Atommodell kennen wir bereits aus dem Chemieunterricht der 9. Jahrgangsstufe.
Radioaktive Strahlung entsteht beim Zerfall von Atomkernen radioaktiver Atome. Von *natürlicher Radioaktivität* spricht man, wenn der radioaktive Stoff in der Natur vorkommt; wird der radioaktive Stoff dagegen künstlich erzeugt, so handelt es sich um eine *künstliche Radioaktivität.*

Natürliche Radioaktivität weisen 51 radioaktive Atomarten auf, darunter rein radioaktive Elemente wie z. B. Uran und Radium, aber auch Isotope (siehe Kap. 7.1., S. 76) von uns eigentlich als nicht radioaktiv bekannten Elementen. In der Natur kommen Verbindungen dieser Atomarten z. B. Oxide oder Salze vor, die als Bestandteile in verschiedenen Gesteinen vorhanden sind. Radioaktive Strahlung findet sich deshalb – je nach Gestein mehr oder weniger – überall in unserer Umgebung; wir sind also ständig einer radioaktiven Strahlung ausgesetzt.

7.2.2. Nachweis der radioaktiven Strahlung

Der erste Nachweis der radioaktiven Strahlung erfolgte durch die Schwärzung von Photoplatten. Dieses photographische Verfahren wird auch heute noch benutzt, um durch sogenannte *Autoradiographien* festzustellen, ob bestimmte Materialien z. B. leuchtende Farben in der Glasur einer Kachel radioaktive Strahlung aussenden.
Das vermutlich radioaktive Material wird dabei auf einen *Röntgenfilm* gelegt und ruft auf diesem eine Schwärzung hervor, die die Partien des Materials wiedergibt, die radioaktive Strahlung aussenden *(Abb. 78.2.)*.
Radioaktive Strahlung ruft z. B. bei Zinksulfid, das wir schon von der braunschen Röhre her kennen, Leuchterscheinungen hervor. Diese Lichtblitze *(Szintillation)* kann man über eine Fotozelle und einen nachfolgenden Verstärker (Sekundärelektronenvervielfacher) zählen.

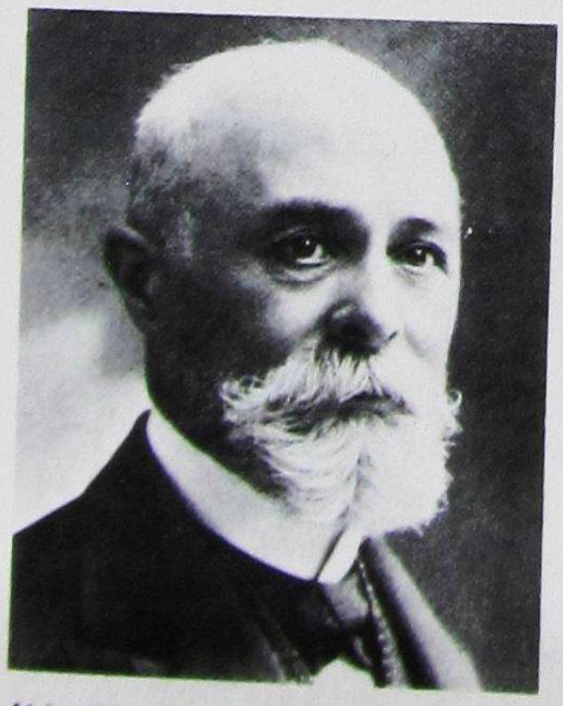


Abb. 78.1. HENRI BECQUEREL

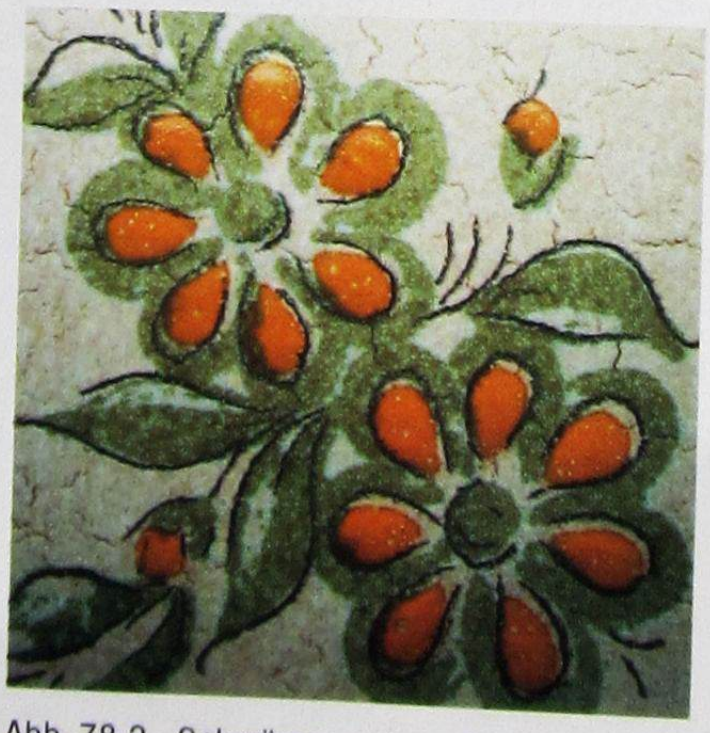


Abb. 78.2. Schwärzung eines Röntgenfilms durch Uranylfarben (rote Blütenblätter) in der Glasur einer Kachel

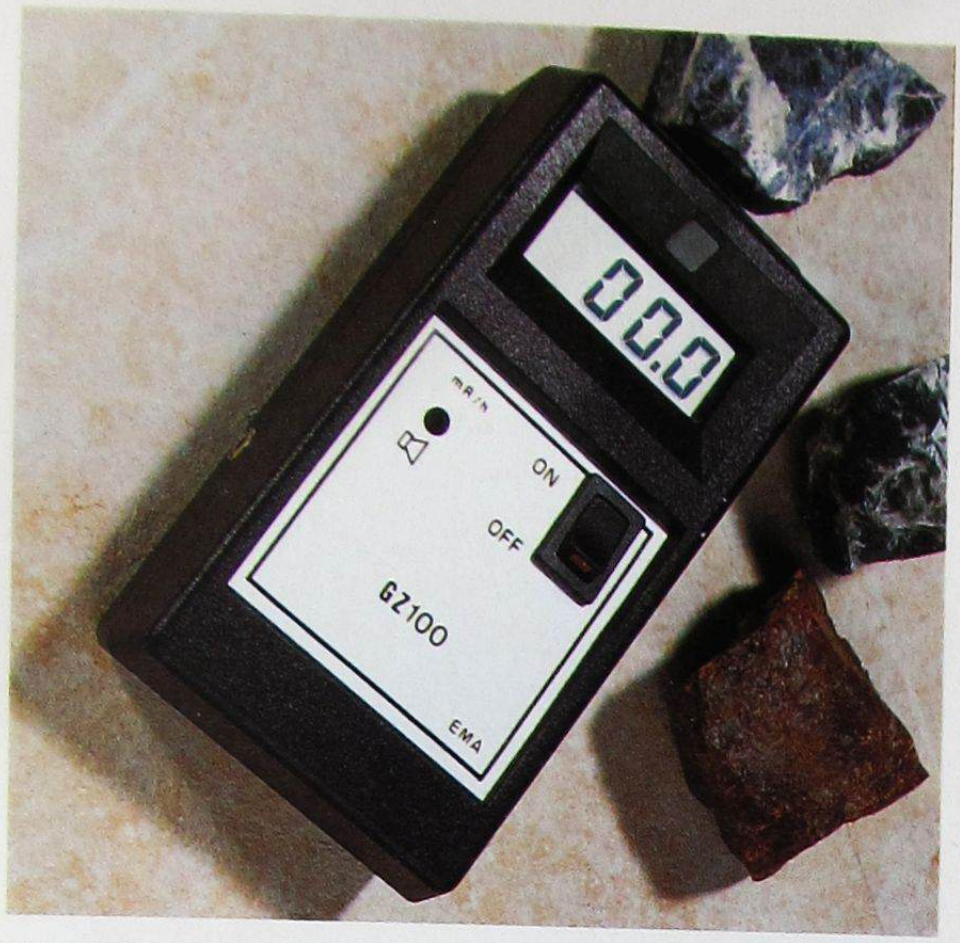


Abb. 79.1. Geiger-Müller-Zählgerät mit Glimmerfenster und Digitalanzeige

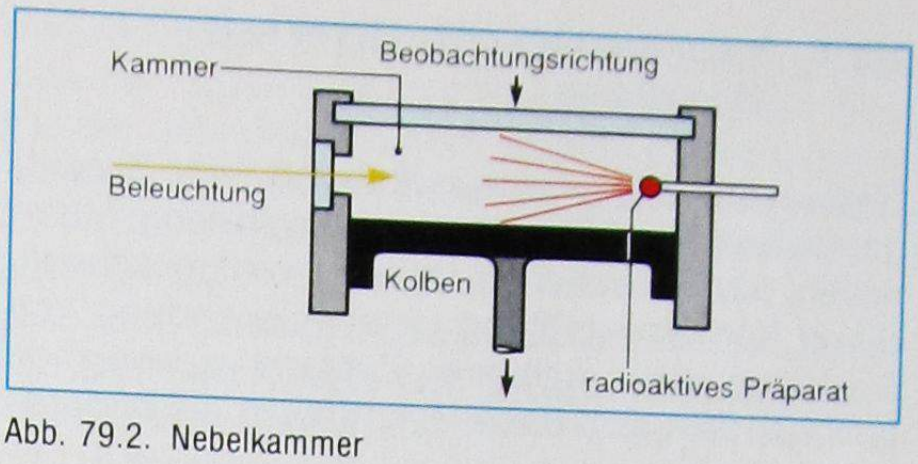


Abb. 79.2. Nebelkammer

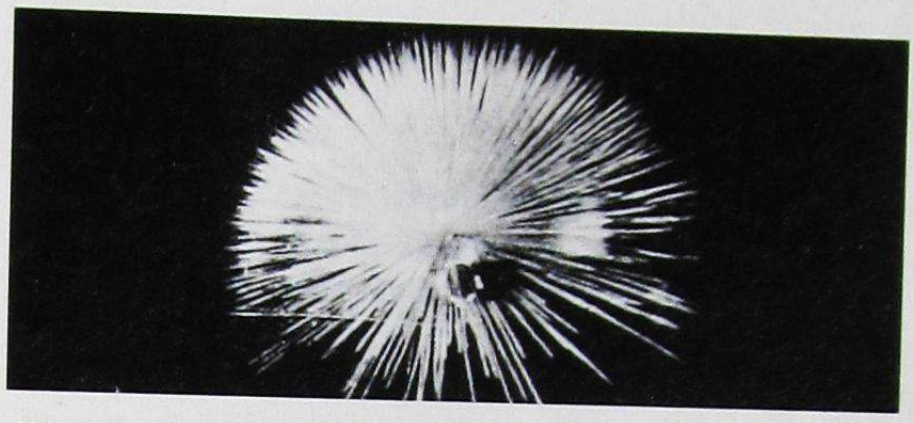


Abb. 79.3. Spuren eines α-Strahlers in einer Nebelkammer

In einer Ionisationskammer wird durch das zu messende radioaktive Präparat Luft ionisiert, deren Leitfähigkeit dadurch zunimmt (siehe *S. 56 f.*). Der entstehende Ionisationsstrom kann gemessen werden.

Die Ionisationswirkung radioaktiver Strahlung macht man sich auch im *Geiger-Müller-Zählrohr (Abb. 79.1.)* zunutze. Über ein Glimmerfenster kann radioaktive Strahlung in ein Rohrstück eintreten, das elektrisch negativ geladen ist und in dem sich ein elektrisch positiv geladener Draht befindet. Durch Ionisation der Gas-Moleküle im Rohr entsteht eine Elektronenlawine, die man als Spannungsschwankung an einem Widerstand *R* mit einem elektrischen Zähler registrieren oder als Knacken über einen Lautsprecher hörbar machen kann. Ein Zählrohr lässt auch dann in wohl längeren unregelmäßigen Abständen ein Knacken hören, wenn kein radioaktives Präparat in der Nähe ist. Dies wird durch die *Umgebungsstrahlung*, die bereits angesprochen wurde, aber auch durch die *kosmische Strahlung*, die vom Weltraum auf die Erde trifft, verursacht.

Direkt sichtbar machen kann man die Bahnen radioaktiver Strahlung in einer *Nebelkammer (Abb. 79.2.)*. Die Luft in einer Nebelkammer enthält einen hohen Anteil Wasserdampf (oder ein Gemisch aus Wasser- und Spiritusdampf). Wird das Volumen vergrößert, kühlt sich die Luft ab und wird mit Wasserdampf übersättigt. Dadurch kondensiert der Dampf als Nebel, in dem wir die Bahnen radioaktiver Strahlen sehen können *(Abb. 79.3.)*. Diese Bahnen sind mit den Kondensstreifen von Flugzeugen vergleichbar.

Versuch

Man bringt ein radioaktives Präparat in eine Nebelkammer, zu der senkrecht ein sehr starkes Magnetfeld wirkt.

Beobachtung. Es bilden sich drei Bahnen aus, die zeigen, dass es drei verschiedene Stahlenarten geben muss. Wir bezeichnen sie mit α-Strahlen, β-Strahlen und γ-Strahlen *(Abb. 79.4.)*.

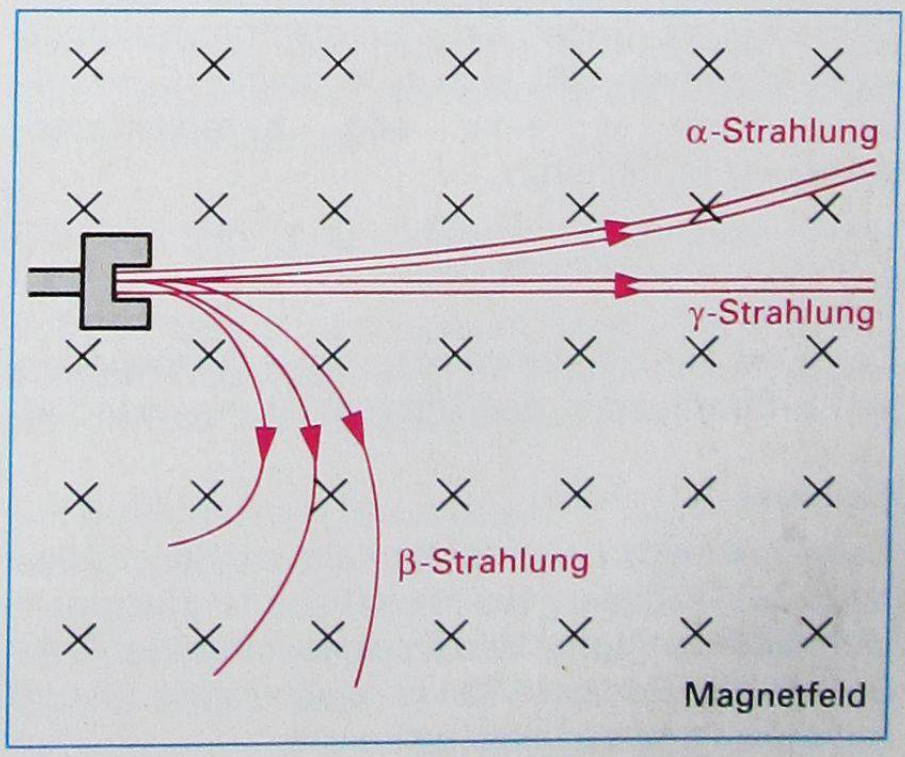


Abb. 79.4. Trennung der Strahlungsarten durch ein starkes Magnetfeld

7.2.3. Radioaktiver Kernzerfall – Strahlung

Radioaktive Stoffe sind auf Grund ihrer Zusammensetzung nicht so stabil wie die anderen Materialien. Sie versuchen, mehr oder weniger schnell, durch Kernumwandlung unter Aussendung von Strahlung einen stabileren Zustand zu erreichen und wandeln sich dabei eventuell in ein anderes Element um.

α-Zerfall

Einzelne Atomkerne des radioaktiven Stoffes senden spontan ein sogenanntes *α-Teilchen* aus; dies ist elektrisch positiv geladen und besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen, d. h., es ist mit dem Kern eines Helium-Atoms identisch *(Abb. 80.1.a.)*. Bei einem radioaktiven Stoff, der α-Teilchen aussendet, reichen die Kernkräfte nicht aus, um die Wirkung der abstoßenden Kräfte zwischen den positiv geladenen Protonen im Atomkern völlig auszugleichen; der Atomkern sendet ein α-Teilchen aus und geht dadurch in einen stabileren Zustand über. Bei manchen Stoffen wiederholt sich der Vorgang eventuell mehrmals, bis ein Atom mit einem stabilen Kern entsteht.

Der Heliumkern ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ wird mit sehr großer Geschwindigkeit $\left(\text{etwa } 20 \cdot 10^6 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \approx 5{,}5 \cdot 10^6 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}\right)$ aus dem Atomkern herausgeschleudert. Bei diesem Kernzerfall sinkt die Protonenzahl des verbleibenden Atoms um 2 und die Nukleonenzahl um 4. Dabei entsteht also ein Atom eines anderen Elements; es findet eine *Elementumwandlung* statt. Allgemein läßt sich eine solche Elementumwandlung in einer sog. *Kernreaktionsgleichung* formulieren:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

Das Element X hat sich also unter Aussendung von α-Strahlung in das Element Y umgewandelt.

Beispiel

Beim radioaktiven Stoff *Radium* senden ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra}$-Kerne α-Teilchen (${}^{4}_{2}\mathrm{He}$-Kerne) aus und wandeln sich dabei in Atome des Edelgases Radon ${}^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ um. Diese Edelgas-Atome sind selbst wieder radioaktiv und zerfallen weiter.

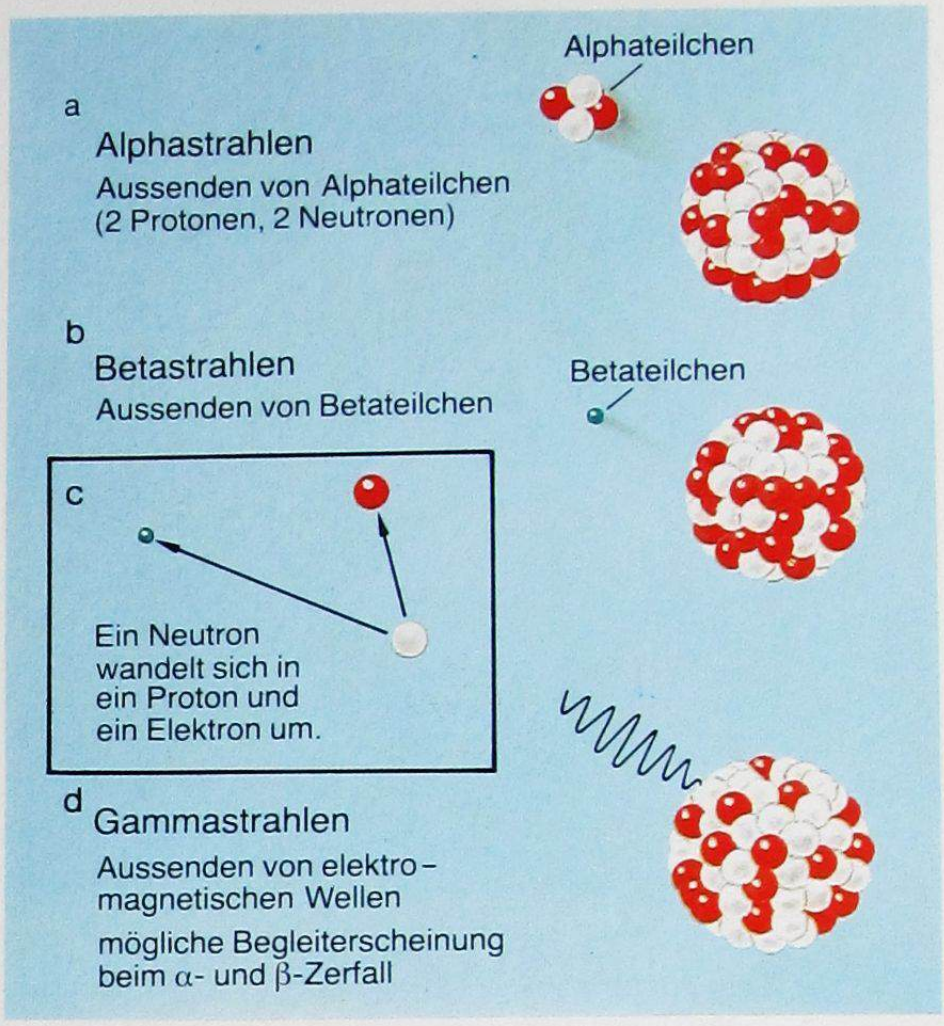


Abb. 80.1. α-, β-, γ-Strahlung

Der Kernzerfall des Radium-Atoms lässt sich in der Kernreaktionsgleichung darstellen:

$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

β-Zerfall

Einzelne Atomkerne des radioaktiven Stoffes senden spontan β-Teilchen aus; dabei handelt es sich um *Elektronen (Abb. 80.1.b.)*, also um elektrisch negativ geladene Elementarteilchen. Die Erklärung des β-Zerfalls machte zunächst große Schwierigkeiten.
Wir erinnern uns: Nach unserer Modellvorstellung enthält ein Atomkern nur Protonen und Neutronen. Woher kommen dann die Elektronen?
Im Jahre 1934 stellte ENRICO FERMI, ein italienischer Physiker, eine Theorie der β-Strahlung auf. Danach wandelt sich ein Neutron im Kern in ein Proton und ein Elektron um *(Abb. 80.1.c.)*. Das Elektron durchfliegt die Elektronenhülle und verlässt als schnelles β-Teilchen das Atom. Der Kern besitzt nach der β-Emission 1 Proton mehr und 1 Neutron weniger. Seine Protonenzahl und damit seine Ordnungszahl ist um 1 größer geworden; seine Nukleonenzahl ändert sich nicht.

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-} $$

Bisher ist der Fall, dass sich die Ordnungszahl erhöht, nicht aufgetreten. In dieser Kernreaktionsgleichung fällt auf, dass die Summen der Nukleonenzahlen und der Ordnungszahlen auf beiden Seiten übereinstimmen müssen. Das Elektron muss also die Ordnungszahl –1 haben, was auch logisch sinnvoll ist, da es die entgegengesetzte Ladung wie ein Proton hat.

Beispiel

Radioaktive Kerne von Kohlenstoff-Atomen ($^{14}_{6}C$-Kerne) senden jeweils ein β-Teilchen (elektrisch negativ geladenes Elektron; $^{0}_{-1}e^{-}$) aus und wandeln sich bei diesem Kernzerfall in Kerne von Stickstoff-Atomen $^{14}_{7}N$ um. Die Kernreaktionsgleichung lautet:

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e^{-},$$

wobei auch hier wieder die entsprechenden Zahlensummen auf beiden Seiten übereinstimmen müssen.

α-, β-, γ-Strahlen

α-Strahlen nennt man die von einem radioaktiven Stoff beim α-Zerfall ausgesandten α-Teilchen (Helium-Atomkerne $^{4}_{2}He$). β-Strahlen bestehen aus den von einem radioaktiven Stoff beim β-Zerfall ausgesandten β-Teilchen (Elektronen e^{-}). γ-Strahlen können als Begleiterscheinung eines α-Zerfalls oder eines β-Zerfalls auftreten. Der Atomkern gibt dabei überschüssige Energie in Form von harter Röntgenstrahlung, der sog. γ-Strahlung ab *(Abb. 80.1.d.)*.

7.2.4. Energie der radioaktiven Strahlung

Radioaktive Strahlung kann Luft ionisieren, sie muss also eine bestimmte Energie besitzen.

Versuche

1. Zwischen die Platten eines aufgeladenen Kondensators, die über ein Elektroskop verbunden sind, bringt man ein radioaktives Präparat (α-Strahler). Anschließend entfernt man das Präparat ca. 10 cm von den Kondensatorplatten.
2. Man umhüllt das Präparat mit Papier und bringt es wie oben wieder zwischen die Kondensatorplatten.

Beobachtungen. Zu **1.** Das Elektroskop entlädt sich nur, wenn sich das Präparat zwischen den Platten befindet. Befindet es sich außerhalb der Kondensatorplatten, findet keine Entladung statt.
Zu **2.** Bei Umhüllung mit Papier findet keine Entladung statt.

1. Die Reichweite der α-Strahlung beträgt nur einige Zentimeter.
2. α-Strahlung kann bereits durch Papier abgeschirmt werden.

Versuche

1. Über ein starkes Magnetfeld werden wie in *Abb. 79.4.* die Strahlungsarten eines radioaktiven Präparats getrennt und mit Hilfe eines Zählrohrs nachgewiesen. Die Entfernung des Zählrohrs vom Präparat wird für die einzelnen Strahlungsarten jeweils verändert.
2. In den Strahlengang der β-Strahlung wird zwischen Zählrohr und Strahler ein Aluminiumblech von ca. 1 mm Dicke geschoben.
3. In den Strahlengang der γ-Strahlung wird zwischen Zählrohr und Präparat eine Bleiplatte geschoben.
Beobachtungen. Zu **1.** Auch wenn die Entfernung, in der α-Strahlung nicht mehr nachweisbar ist, überschritten wird, lassen sich β- und γ-Strahlung noch nachweisen.
Zu **2.** Die β-Strahlung wird vollständig abgeschirmt, das Zählrohr zeigt keine β-Strahlung mehr an.
Zu **3.** Das Zählrohr zeigt keine oder eine sehr stark verminderte γ-Strahlung an.

Für die γ-Strahlung gibt es dabei keine Reichweite, Messungen haben jedoch ergeben, dass die Energie einer γ-Strahlung mit wachsender Entfernung abnimmt.

Die Durchdringungsfähigkeit radioaktiver Strahlung ist in *Abb. 82.1.* dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur das durchstrahlte Material, sondern auch das Präparat selbst einen Einfluss auf die Durchdringungsfähigkeit hat.

Die Strahlung des Isotops [$^{137}_{55}Cs$]-Caesium nimmt bei Abschirmung mit einer 3,5 cm dicken Aluminiumplatte um die Hälfte ab, beim [$^{60}_{27}Co$]-Cobalt benötigt man zur Abschirmung auf die Hälfte der Strahlungsenergie eine 5,3 cm dicke Aluminiumschicht.

Somit bestimmt also das radioaktive Präparat selbst die Durchdringungsfähigkeit und die Reichweite seiner Strahlung.
In der Medizin wird die γ-Strahlung des Cobaltisotops [$^{60}_{27}$Co]-Cobalt zur *Tumorbekämpfung* eingesetzt. Radioaktive Strahlung von Isotopen findet aber auch Verwendung in der *Dickenmessung* von Materialien und in der *Untersuchung von Schweißnähten* auf Risse.

Mit Hilfe der sogenannten *Indikator- oder Leitisotopenmethode* lassen sich Stofftransporte, u. a. auch in Organismen, untersuchen. Wenn man z. B. dem menschlichen Körper radioaktives Iod in sehr geringen Mengen zuführt, so verteilt sich dieses genauso wie das normale Iod. Auf Grund der Strahlung kann man die Verteilung feststellen und daraus Rückschlüsse auf die Funktion der Schilddrüse ziehen.

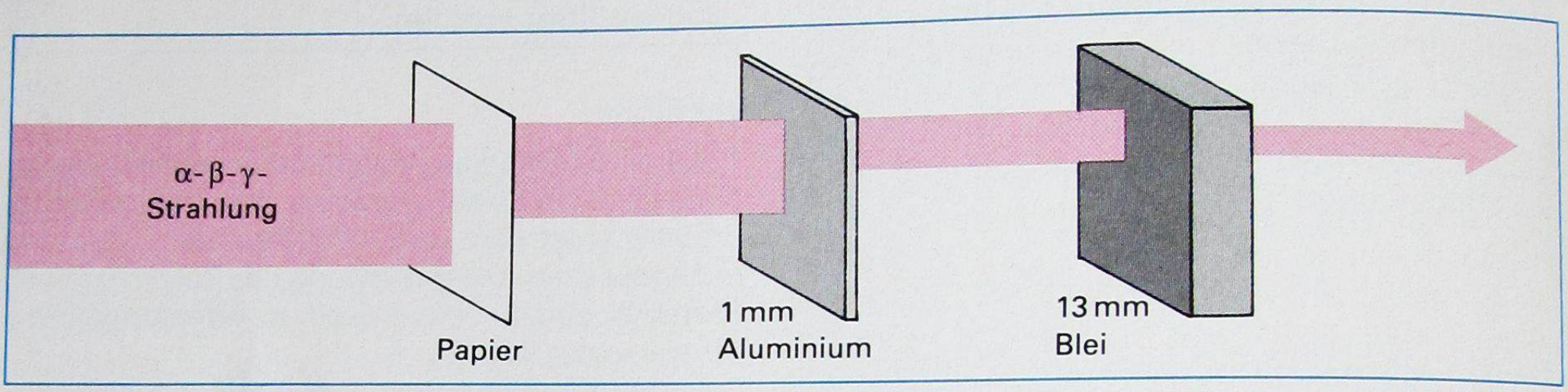


Abb. 82.1. Durchdringungsfähigkeit radioaktiver Strahlung

Zusammenfassung

1. Radioaktive Strahlung entsteht beim Zerfall von Atomkernen radioaktiver Stoffe.
2. Wir unterscheiden 3 Arten der radioaktiven Strahlung: α-, β- und γ-Strahlung.
3. α-Strahlung besteht aus Helium-Atomkernen, also aus 2 Protonen und 2 Neutronen (elektrisch positive Ladung).
4. β-Strahlung besteht aus schnellen Elektronen (elektrisch negative Ladung).
5. γ-Strahlung ist eine energiereiche harte Röntgenstrahlung, die ähnliche Eigenschaften wie das Licht aufweist.
6. Radioaktive Elemente sind instabil und wandeln sich unter α-Zerfall durch Aussendung eines α-Teilchens und unter β-Zerfall durch Aussendung eines β-Teilchens in andere Elemente um.
7. Diese Umwandlung erfolgt solange, bis der Kern stabil ist. Zum Ausgleich kann dabei überschüssige Energie in Form von γ-Strahlung abgegeben werden.
8. α-Strahlung hat die geringste Reichweite, sie liegt in Luft in der Größenordnung von etwa 10 Zentimetern. Eine vollständige Abschirmung der α-Strahlung erfolgt bereits durch ein Blatt Papier.
9. β-Strahlung hat eine größere Reichweite als α-Strahlung, in Luft beträgt sie einige Meter. Sie kann durch eine Aluminiumplatte von etwa 1 mm Dicke abgeschirmt werden.
10. γ-Strahlung hat die größte Reichweite, in Luft beträgt sie viele Meter. Sie kann nur durch dicke Bleiplatten abgeschirmt oder stark geschwächt werden.
11. Die Durchdringungsfähigkeit und die Reichweite einer radioaktiven Strahlung wird durch das Präparat selbst bestimmt.

Aufgaben

1. Nenne Methoden, wie man die radioaktive Strahlung nachweisen kann.
2. Welche Arten der radioaktiven Strahlung gibt es? Beschreibe einen Versuch, mit dessen Hilfe man sie unterscheiden kann.
3. Welche Vorgänge finden beim α-Zerfall statt?
4. Welche Vorgänge finden beim β-Zerfall statt?
5. Beschreibe Versuche, mit denen man die Durchdringungsfähigkeit und die Reichweite der Strahlungsarten untersuchen kann. Nenne die Ergebnisse.

Aus der Geschichte der Physik: Die Entdeckung der Radioaktivität

Im Jahr 1789 entdeckte der deutsche Chemiker HEINRICH KLAPROTH (1743 bis 1817) in einem schweren, schwarzen Erz, der Pechblende, das neue Metall *Uran*, das er der Art seiner Zeit folgend nach dem Planeten Uranus benannte.

Mehr als hundert Jahre später interessierte sich der französische Physiker ANTOINE-HENRI BECQUEREL (1852 bis 1908, *Abb. 78.1.*) für die im Jahr 1895 von dem deutschen Physiker WILHELM CONRAD RÖNTGEN entdeckten Röntgenstrahlen und experimentierte mit fluoreszierenden Substanzen wie Kaliumuranylsulfat, um zu untersuchen, ob in deren Strahlung Röntgenstrahlung enthalten ist. Er umwickelte dazu eine fotografische Platte mit schwarzem Papier und legte sie zusammen mit einem Kaliumuranylsulfatkristall in die Sonne. Die Platte wurde geschwärzt, und er führte das auf die fluoreszierende Strahlung unter Einwirkung des Sonnenlichts zurück. Wegen Bewölkung unterbrach er seine Experimente, legte aber eine Fotoplatte und einen Kristall in eine Schublade. Die Platte wies nach der Entwicklung einen starken Grauschleier auf *(Abb. 83.1.)*. Die Strahlung hatte also nichts mit dem Sonnenlicht oder mit Fluoreszenz zu tun. Für diese Entdeckung erhielt BECQUEREL im Jahre 1903 den Nobelpreis für Physik.

Die Experimente von BECQUEREL mit Uranstrahlung wurden vor allem von MARIE CURIE, geb. SKLODOWSKA (1867 bis 1934) und PIERRE CURIE (1859 bis 1906) fortgeführt *(Abb. 83.2.)*.

MARIE CURIE arbeitete im Labor von HENRI BECQUEREL und wies im Jahr 1898 nach, dass auch das Element *Thorium* strahlt. Sie untersuchte Pechblende und vermutete, dass neben dem Element Uran ein weiteres Element enthalten sein musste, das viel stärker strahlt.

Dieses Element nannte sie *Radium*. Um 0,1 g Radiumchlorid herzustellen, benötigte sie 1 t Pechblende und vier Jahre. Sie war es auch, die für diese Strahlung den Begriff *Radioaktivität* prägte. Für ihre Forschungen erhielten PIERRE und MARIE CURIE zusammen mit BECQUEREL im Jahr 1903 den Nobelpreis für Physik. 8 Jahre später erhielt MARIE CURIE für die Entdeckung des *Poloniums* und des *Radiums* auch noch den Nobelpreis für Chemie.

PIERRE CURIE untersuchte auch die Wärmeenergie, die von Radium in Form von Strahlung abgegeben wird. Im Jahr 1901 stellte er fest, dass ein Gramm Radium pro Stunde eine Wärmeenergie von 588 Joule abgibt. Diese Tatsache war vor allem deshalb beeindruckend, weil Radium diese Energie kontinuierlich jahrhundertelang und erst nach 1600 Jahren halb so viel abgibt. Das Gesetz, dass die Radioaktivität einer Substanz exponentiell abnimmt, wiesen im Jahr 1899 die beiden deutschen Physiker ELSTNER und GEITEL nach.

In der Folgezeit wurden von verschiedenen Wissenschaftlern weitere radioaktive Elemente entdeckt und man entwickelte auch Geräte, um die radioaktive Strahlung nachzuweisen und zu messen. RUTHERFORDS Assistent JOHANNES WILHELM GEIGER (1882 bis 1945) baute im Jahr 1908 einen ersten *Geigerzähler (Abb. 84.1.)*, mit dem die radioaktive Strahlung über eine elektrische Entladung als klickendes Geräusch hörbar gemacht werden konnte.

Eine entscheidende Frage, die sich aus allen Versuchen ergab, war die Frage nach dem Ursprung der durch den radioaktiven Zerfall freigesetzten Energie. RUTHERFORD schrieb dazu: „Die Materie verliert bei jeder Phase der Umwandlung an Atomenergie, und die ausgestrahlte Energie stammt

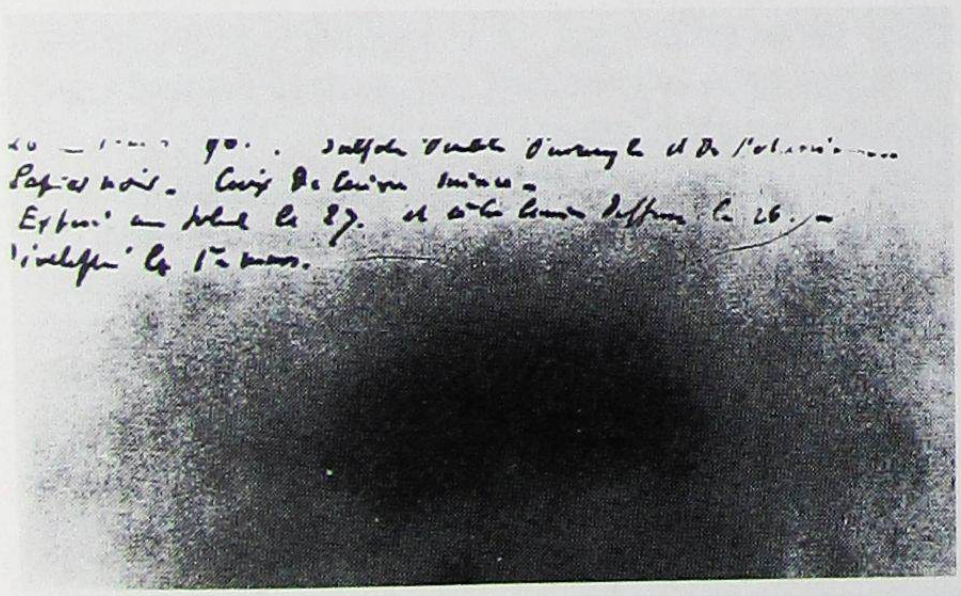


Abb. 83.1. Erste von radioaktiver Strahlung eines Uran-Minerals (damals als „Becquerel"-Strahlen bezeichnet) geschwärzte Fotoplatte aus dem Jahr 1896

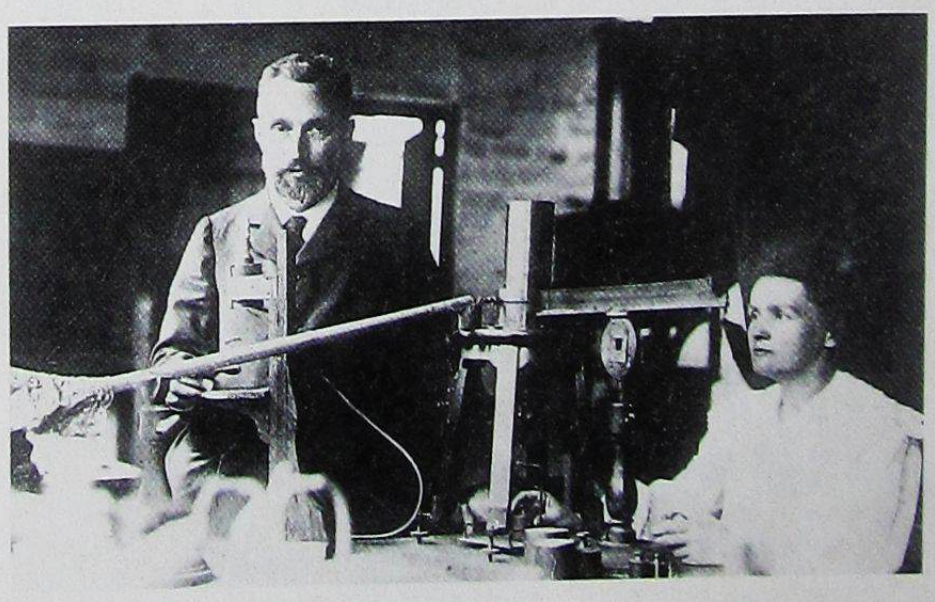


Abb. 83.2. Das Ehepaar CURIE

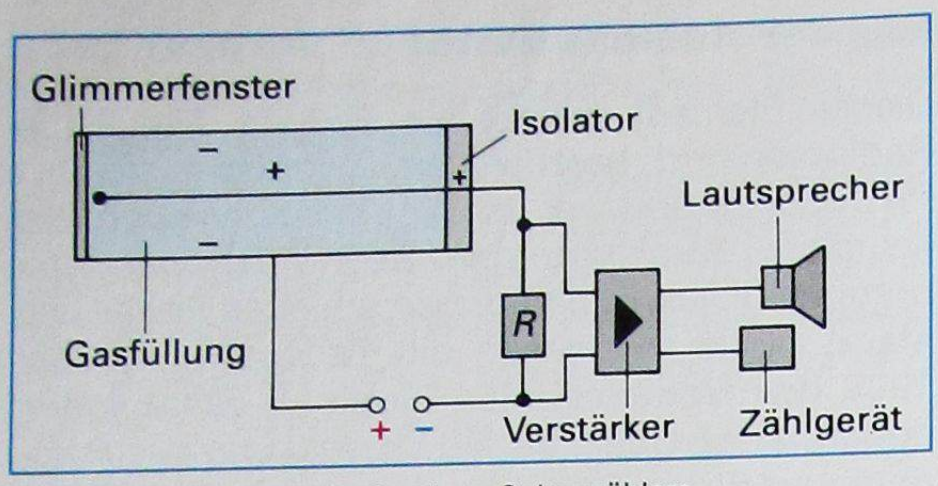


Abb. 84.1. Funktionsprinzip eines Geigerzählers

aus der im Inneren der Atome aufgespeicherten Energie ...“ Erst durch viele weitere Versuche und Überlegungen konnten Modelle entwickelt werden, die diese Frage klärten. Probleme bereiteten aber auch die vielen neuen radioaktiven Elemente, die von den Wissenschaftlern gefunden wurden. In den Jahren 1911 bis 1913 erfolgte die Einordnung dieser Elemente in das Periodensystem und man erkannte, dass Ordnungs- und Kernladungszahl identisch sind.

Das Jahr 1911 markierte wichtige Entdeckungen. RUTHERFORD hatte sein Atommodell vorgelegt. Mit dem Geigerzähler konnte bereits radioaktive Strahlung nachgewiesen werden, aber allein der Nachweis genügte nicht, man wollte diese Strahlung sichtbar machen, ihren Weg und ihr Wesen genauer erforschen.

Der schottische Physiker CHARLES THOMSON REES WILSON (1869 bis 1959) arbeitete eigentlich an der Erforschung der Wolken und versuchte, künstliche Wolken im Labor zu erzeugen. Er brachte feuchte Luft dazu, sich auszudehnen. Die Luft kühlte ab und es bildeten sich feine Wassertröpfchen, wobei er feststellte, dass die Anwesenheit von Staub oder Ionen diese Bildung förderte. Schließlich fiel ihm auf, dass energiereiche Strahlung Ionen erzeugt, und er stellte staubfreie Luft her, die gerade so feucht war, dass sich keine Wassertröpfchen bildeten. Durch Beschuss mit energiereicher Strahlung bildeten sich Ionen, um die wiederum Wassertröpfchen entstanden. Damit konnte man nicht nur die Strahlung registrieren, sondern auch ihren Weg verfolgen. Über Magnetfelder und eine eventuelle Krümmung des Teilchenwegs konnte man Rückschlüsse auf die elektrische Ladung und die Masse des Teilchens ziehen. Außerdem konnte man Zusammenstöße zwischen den Teilchen beobachten. Bis zum Jahr 1911 perfektionierte WILSON seine *Nebelkammer* so, dass sie ein unentbehrliches Hilfsmittel in der Atom- und Kernforschung wurde. Für seine Arbeit erhielt er im Jahr 1927 den Nobelpreis für Physik.

Im gleichen Jahr 1911 stellte schließlich der österreichische Physiker VIKTOR FRANZ HESS fest, dass eine Strahlung aus dem Weltall die Erde erreicht, die auch radioaktiv ist. Er nannte sie *kosmische Strahlung.* Für diese Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis für Physik.

In der Folgezeit beschäftigten sich die Wissenschaftler immer mehr mit den Auswirkungen dieser Strahlung auf den verschiedensten Gebieten, aber auch mit Grundlagen der Kernumwandlung, was schließlich im Jahr 1939 zur Kernspaltung des Urans führte, womit das *Atomzeitalter* endgültig begann.

7.3. Radioaktiver Zerfall und Kernumwandlungen

7.3.1. Halbwertszeit

Radioaktive Prozesse sind Zufallsprozesse. Man kann also nicht vorhersagen, zu welcher Zeit gerade ein ganz bestimmtes Atom eines radioaktiven Stoffes zerfallen wird. Es kann im nächsten Augenblick, in einigen Tagen oder aber erst in Millionen von Jahren spontan ein α- oder β-Teilchen aussenden.

Es ist aber möglich, bei der ungeheuer großen Zahl von Atomen einer bestimmten radioaktiven Stoffportion eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber zu machen, welcher Bruchteil der Atome in einer bestimmten Zeitspanne zerfallen wird.

Von 1 g Radium ist z. B. die Hälfte der Atome nach 1590 Jahren zerfallen, d. h., nach dieser Zeit sind von 1 g Radium nur mehr $\frac{1}{2}$ g vorhanden, nach weiteren 1590 Jahren noch $\frac{1}{4}$ g usw.

Die Zeit, nach der die Hälfte einer gegebenen, sehr großen Zahl von radioaktiven Atomen zerfallen ist, heißt **Halbwertszeit**.

Die für jede radioaktive Atomart charakteristischen Halbwertszeiten sind sehr unterschiedlich. Sie liegen in der Größenordnung zwischen 10^{-10} Sekunden und 10^{16} Jahren. Am häufigsten kommen jedoch radioaktive Atomarten mit Halbwertszeiten von einigen Minuten bis zu einigen Jahren vor (vgl. *Tab. 85.1.*).

In *Abb. 85.1.* ist die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne einer bestimmten radioaktiven Stoffportion in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Häufig sind Isotope von normalerweise nicht radioaktiven Elementen radioaktiv, man bezeichnet sie dann oft kurz als **Radioisotope**. Sie besitzen vielerlei Anwendungen in Wissenschaft und Technik. Radioisotope können zur Altersbestimmung verwendet werden. Über die Tatsache, dass innerhalb der Halbwertzeit die Hälfte des ursprünglich vorhandenen radioaktiven Materials zerfällt, lässt sich das Alter von historischen und prähistorischen Funden, z. B. von Holzwerkzeugen, das Alter von Gesteinen usw. bestimmen. So war es z. B. möglich, ziemlich genau festzustellen, wann der „Ötzi", ein über Jahrtausende in einem Ötztaler Gletscher eingeschlossener Mensch, gelebt haben muss.

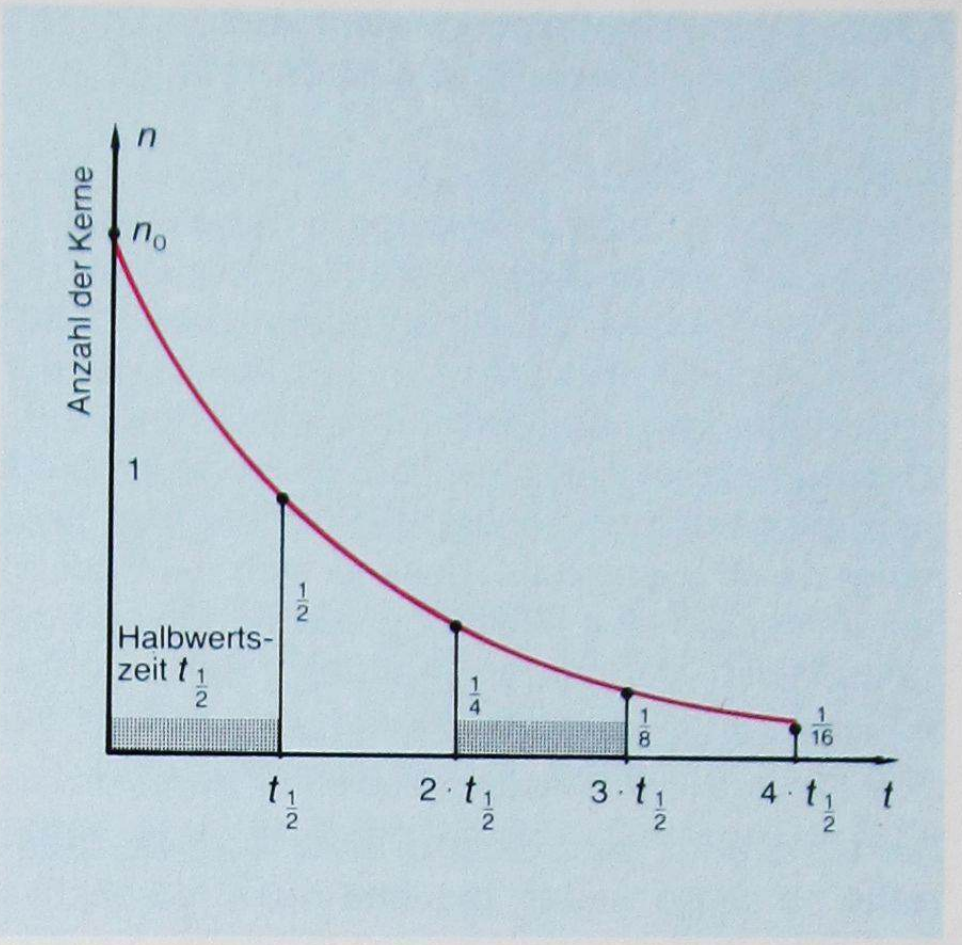


Abb. 85.1. Zeitlicher Verlauf des radioaktiven Zerfalls

	frühere Bezeichnung	Halbwertzeit $T_{1/2}$
$^{238}_{92}U$	Uran I	$4{,}51 \cdot 10^9$ a
$^{234}_{90}Th$	Uran X_1	24,1 d
$^{234}_{91}Pa$	Uran X_2	1,18 min
$^{234}_{91}Pa$	Uran Z	6,75 h
$^{234}_{92}U$	Uran II	$2{,}44 \cdot 10^5$ a
$^{230}_{90}Th$	Ionium	$7{,}52 \cdot 10^4$ a
$^{226}_{88}Ra$		1622 a
$^{222}_{86}Rn$	Radium-Emanation	3,8 d
$^{218}_{84}Po$	Radium A	3,05 min
$^{218}_{85}At$	Radium B′	1,3 s
$^{214}_{82}Pb$	Radium B	26,8 min
$^{214}_{83}Bi$	Radium C	19,7 min
$^{210}_{81}Tl$	Radium C″	1,32 min
$^{214}_{84}Po$	Radium C′	$1{,}62 \cdot 10^{-4}$ s
$^{210}_{82}Pb$	Radium D	22,3 a
$^{210}_{83}Bi$	Radium E	5,0 d
$^{210}_{84}Po$	Radium F	138,375 d
$^{206}_{82}Pb$	Radium G (Uranblei)	–

Tab. 85.1. Zerfallsreihe des Urans (a Jahr, d Tag, h Stunde, min Minute, s Sekunde)

7.3.2. Zerfallsprodukte bei der natürlichen Radioaktivität

Radioaktive Stoffe wandeln sich durch Aussenden von α- oder β-Strahlen unter gleichzeitiger Abgabe von großer Wärme in andere Elemente um. Dabei treten bei einer bestimmten radioaktiven Atomart entweder nur α-Strahlen oder nur β- Strahlen (evtl. begleitet von γ-Strahlung) auf. Untersucht man z. B. eine Radiumprobe, so stellt man aber trotzdem α- und β-Strahlen fest. Dies hängt damit zusammen, dass es sich bei Radium fast immer um eine Mischung aus verschiedenen radioaktiven Atomarten handelt. Beim radioaktiven Zerfall können Atome von Elementen entstehen, die selbst wieder radioaktiv sind.

Der Kernzerfall geht dann in einer sog. **Zerfallsreihe** so lange weiter, bis eine nicht radioaktive (inaktive), also stabile Atomart entsteht. Als Beispiel ist in *Tab. 85.1.* die **Uran-Radium-Zerfallsreihe** dargestellt. Sie beginnt mit dem Uranisotop [$^{238}_{92}$U]-Uran und endet mit dem stabilen Bleiisotop [$^{206}_{82}$Pb]-Blei. Die Reihe umfaßt 14 α- und β-Zerfälle sowie einige Verzweigungen.

7.3.3. Künstliche Kernumwandlung durch Neutronenbeschuss

Im Jahr 1932 gelang es dem englischen Physiker JAMES CHADWICK durch Beschießen von Beryllium-Atomen mit α-Teilchen Kohlenstoff-Atome und freie Neutronen zu erzeugen *(Abb. 86.1.)*.

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Neutronen benützt man zur Herstellung neuer (radioaktiver) Atomkerne, d. h. zu Kernumwandlungen. Da Neutronen ungeladen sind, können sie sich dem elektrisch positiv geladenen Atomkern besonders leicht nähern und in ihn eindringen. Es besteht sogar die Möglichkeit, dass ein Neutron von einem Kern eingefangen wird. Dies gelingt aber nur mit langsamen Neutronen.

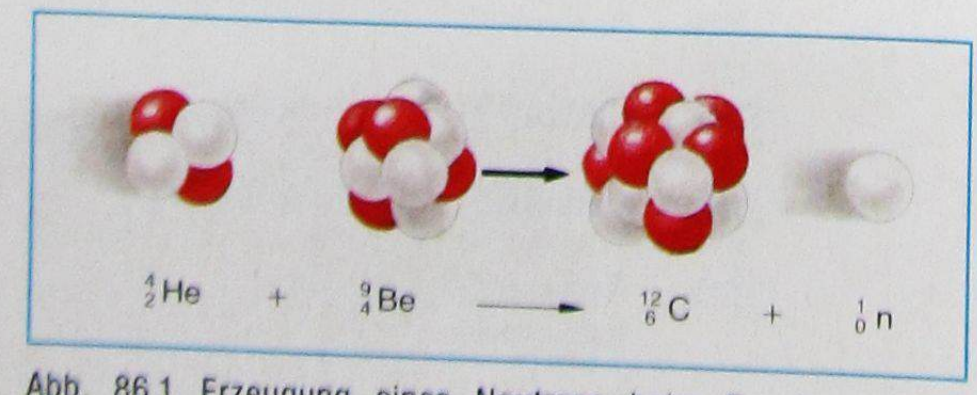


Abb. 86.1. Erzeugung eines Neutrons beim Beschuss eines Berylliumkerns mit einem α-Teilchen

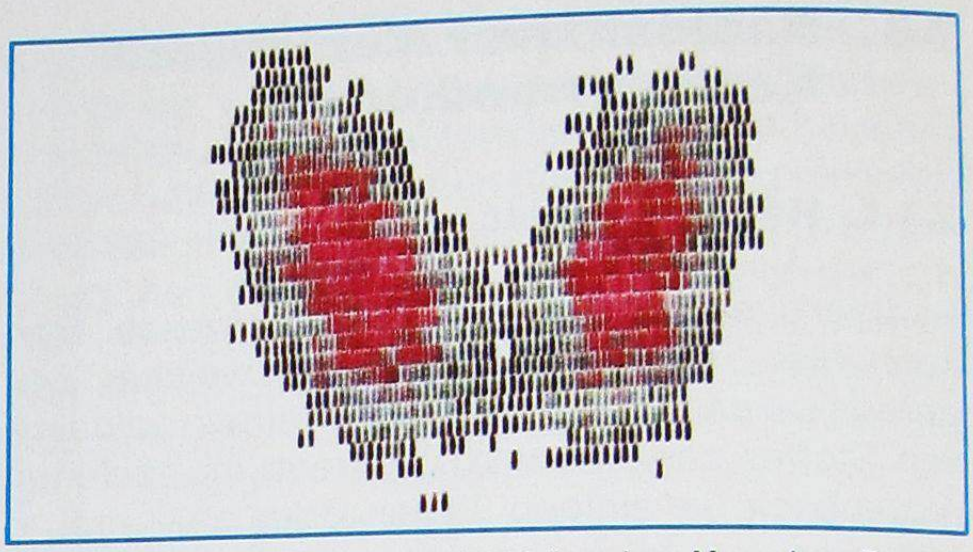


Abb. 86.2. Szintigramm der Schilddrüse eines Menschen. Es stellt die Strahlungsintensität in den einzelnen Organteilen durch Striche in mehr oder weniger großen Abständen dar. Krankhafte Veränderungen des Organs können aus der Intensitätsverteilung erkannt werden.

Schnelle Neutronen, wie sie etwa bei dem Beschuss von $^{9}_{4}$Be-Kernen durch α-Teilchen auftreten, kann man durch bestimmte Stoffe (z. B. Paraffin) bremsen. Mit Hilfe dieser Neutronen ist es möglich, Kernumwandlungen zu erzwingen.

Beispiel

Bei der Bestrahlung von Schwefel mit Neutronen

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + ^{32}_{16}\mathrm{S} \longrightarrow ^{32}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{1}\mathrm{p}$$

entsteht ein Phosphorisotop, das selbst wieder radioaktiv ist und bei einer Halbwertszeit von 14,3 Tagen als „Radiophosphor" ein wichtiges Spurenelement für die Medizin und Biologie geworden ist. Radiophosphor wandelt sich unter Aussendung von β-Strahlen in Schwefel um:

$$^{32}_{15}\mathrm{P} \longrightarrow ^{32}_{16}\mathrm{S} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-}$$

Solche, vom Menschen erzeugten, radioaktiven Isotope der natürlichen Elemente nennt man **künstliche radioaktive Elemente**. Sie finden vielfältige Anwendungen, z. B. in der Medizin, Biologie, Landwirtschaft und Technik.

So kann z. B. der Weg der radioaktiv strahlenden Stoffe im Organismus des Menschen (oder in der Pflanze) mit Hilfe eines Zählrohrs verfolgt oder in einem *Szintigramm (Abb. 86.2.)* aufgezeichnet werden. Damit hat man die Möglichkeit, die Funktion einzelner Organe zu beurteilen.

Durch künstliche Kernumwandlung ist es sogar schon gelungen, einen alten Menschheitstraum zu verwirklichen: Quecksilber in Gold umzuwandeln. Das auf diese Weise hergestellte Gold ist allerdings um ein Vielfaches teurer als natürliches Gold.

7.3.4. Kernspaltung

Die deutschen Chemiker OTTO HAHN und FRITZ STRASSMANN entdeckten im Jahre 1939, dass der Kern des Uranisotops [$^{235}_{92}$U]-Uran beim Beschuss mit langsamen Neutronen in zwei mittelschwere Kernstücke zerbrach, und zwar in einen Barium- und einen Kryptonkern. Außerdem wurden bei dieser sog. *Kernspaltung* noch 2 bis 3 schnelle Neutronen (und ein Teil der im Atomkern gespeicherten sehr großen Energie) freigesetzt *(Abb. 87.1.)*.

Bei der Spaltung des $^{235}_{92}$U-Kerns können auch andere Bruchkerne entstehen, so z. B. ein Lanthan- und ein Bromkern, ein Selen- und ein Cerkern oder ein Strontium- und ein Xenonkern.

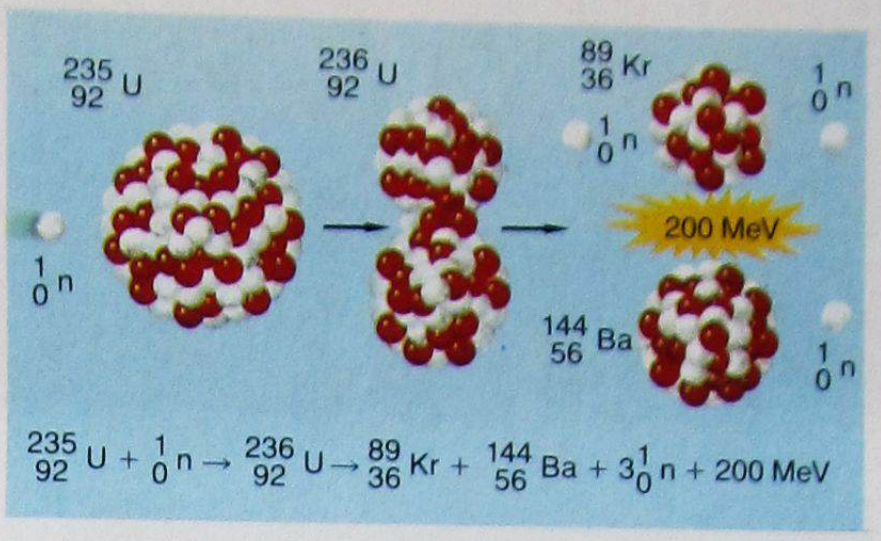


Abb. 87.1. Spaltung eines Urankerns ^{235}U. Der Urankern $^{235}_{92}$U fängt das ankommende Neutron $^{1}_{0}$n ein und bildet einen hochangeregten $^{236}_{92}$U-Kern, der praktisch sofort in zwei Bruchstücke, z. B. Krypton $^{89}_{36}$Kr und Barium $^{144}_{56}$Ba zerfällt. Gleichzeitig werden 2 bis 3 Neutronen und Energie freigesetzt. Die Energie wird in der Atomphysik oft in der Einheit Elektronenvolt (eV) angegeben. Es gilt: 1 eV = 1,6 · 10^{-13} J.

Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Bei der Spaltung eines Urankerns $^{235}_{92}$U entstehen zwei Kernbruchstücke. Die Kernkräfte können wegen ihrer geringen Reichweite die Kernbruchstücke nicht mehr zusammenhalten; die elektrisch positiv geladenen Teile stoßen sich mit großer Kraft ab und fliegen mit hoher Geschwindigkeit auseinander. Sie kommen jedoch nicht sehr weit, weil der Spaltvorgang im Kristallgitter der Uranportion erfolgt. Bei der Wechselwirkung mit den Nachbar-Atomen (Gitterbausteinen) werden sie rasch abgebremst; ihre vorher gewonnene Bewegungsenergie wandelt sich dabei in kinetische Energie der Uranteilchen um. Auf diese Weise wandelt sich die freigesetzte Kernenergie in innere Energie des Uranstückes um (Temperaturerhöhung), die von diesem wiederum in Form von Wärme abgegeben werden kann.

Äquivalenz (Gleichwertigkeit) von Masse und Energie

Der deutsch-amerikanische Physiker ALBERT EINSTEIN *(Abb. 87.2.)* hat schon im Jahr 1905, also lange vor der Entdeckung der Atomkernenergie, aus seiner berühmtgewordenen Relativitätstheorie gefolgert, dass Masse und Energie gleichwertig sind:

Masse kann in Energie und Energie in Masse umgewandelt werden.

Nach der von ihm aufgestellten Formel

$$E = m \cdot c^2$$

Energie = Masse · Quadrat der Lichtgeschwindigkeit

entspricht 1 kg Masse einer Energie von 24 Milliarden Kilowattstunden. Bei der Spaltung von 1 kg reinem [$^{235}_{92}$U]-Uran tritt ein Masseverlust von 1 g auf; dieser entspricht der freigesetzten Kernenergie von 24 Millionen Kilowattstunden (die gleiche Energie wird z. B. beim Verbrennen von etwa 2 Millionen Liter Heizöl frei).

Kettenreaktion

Zerfällt ein Urankern $^{235}_{92}$U in zwei Bruchstücke, so können die dabei freigesetzten 2 oder 3 Neutronen sofort wieder die Spaltung von 2 bzw. 3 weiteren Urankernen verursachen, wobei dann bereits zwischen 4 bis 9 Neutronen frei werden,

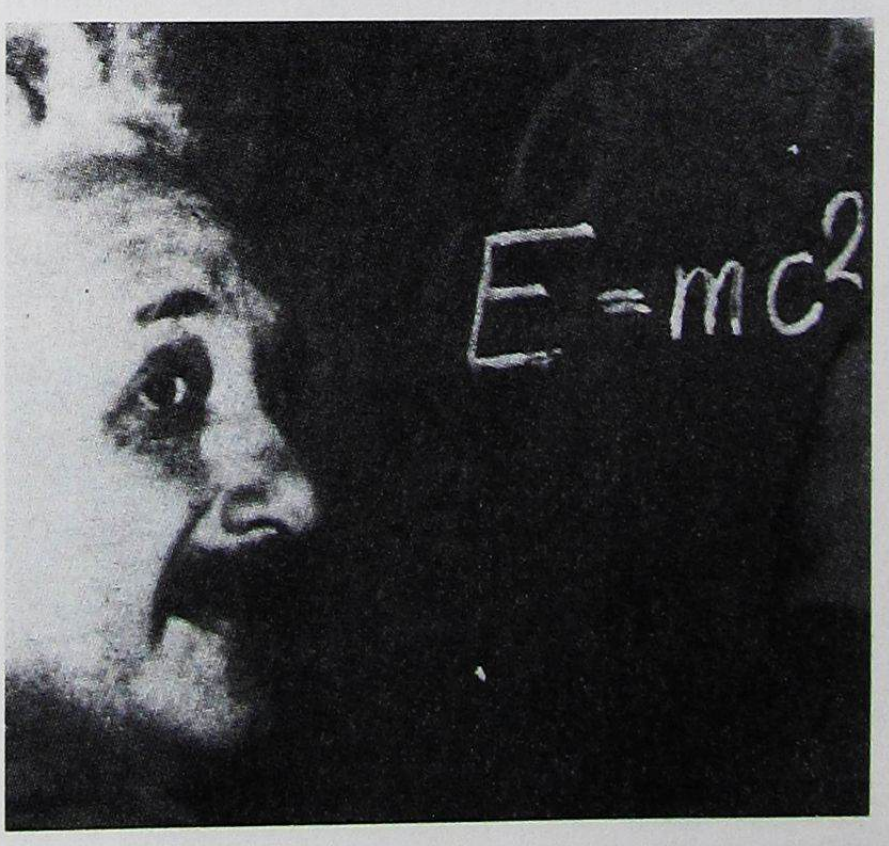


Abb. 87.2. ALBERT EINSTEIN

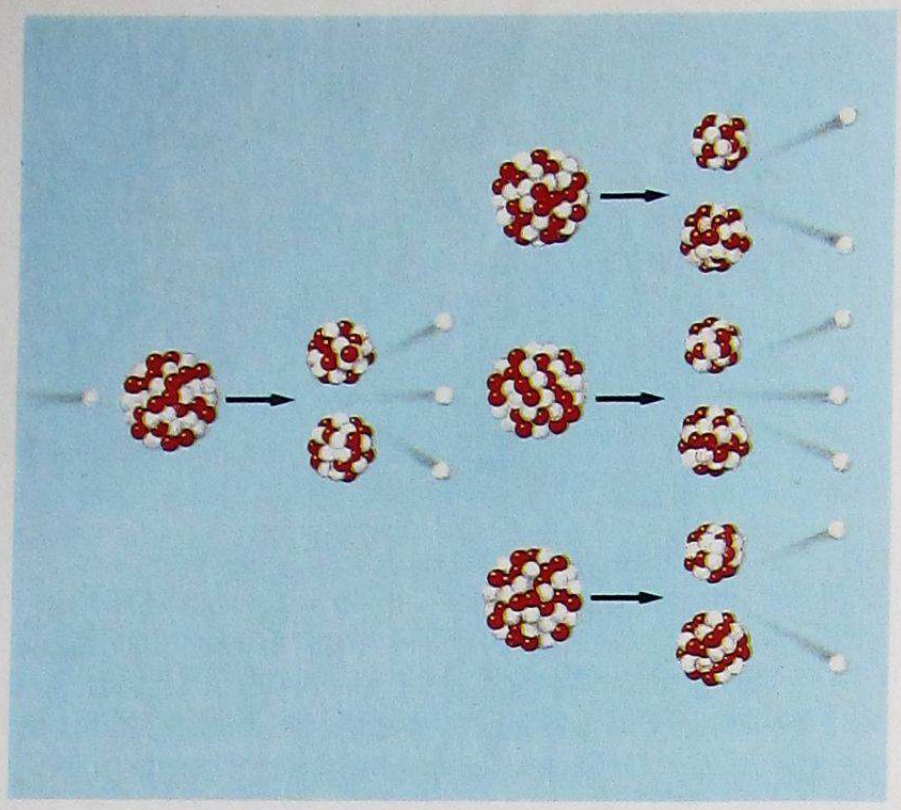


Abb. 88.1. Kettenreaktion in einem Uran-235-Stück

die wiederum neue Urankerne spalten können usw. Diese Spaltung setzt sich lawinenartig durch die ganze Uranportion fort *(Abb. 88.1.)*. Man spricht in diesem Fall von einer Kettenreaktion.

Eine Kettenreaktion tritt ein, wenn Neutronen von spaltbaren Atomkernen aufgenommen und bei der Spaltung 2 oder mehr neue Neutronen freigesetzt werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die bei der Kernspaltung eines Urankerns $^{235}_{92}U$ mit einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 10 000 $\frac{km}{h}$ herausgeschleuderten Neutronen einen neuen Urankern $^{235}_{92}U$ spalten, ist nur gering. Die *schnellen Neutronen* müssen zur wirksamen Kernreaktion vorher *abgebremst* werden. In einem Bremsmittel (z. B. Graphit, schweres Wasser[1]), dem sog. *Moderator*, verringert sich die Geschwindigkeit der schnellen Neutronen bei ihren Wechselwirkungen mit den Moderatorteilchen bis auf eine Geschwindigkeit 2 $\frac{km}{h}$. Diese *langsamen Neutronen* können nun weitere Kernspaltungen hervorrufen *(Abb. 88.2.)*.

[1] In schwerem Wasser ist Deuterium an Stelle von normalem Wasserstoff mit Sauerstoff verbunden.

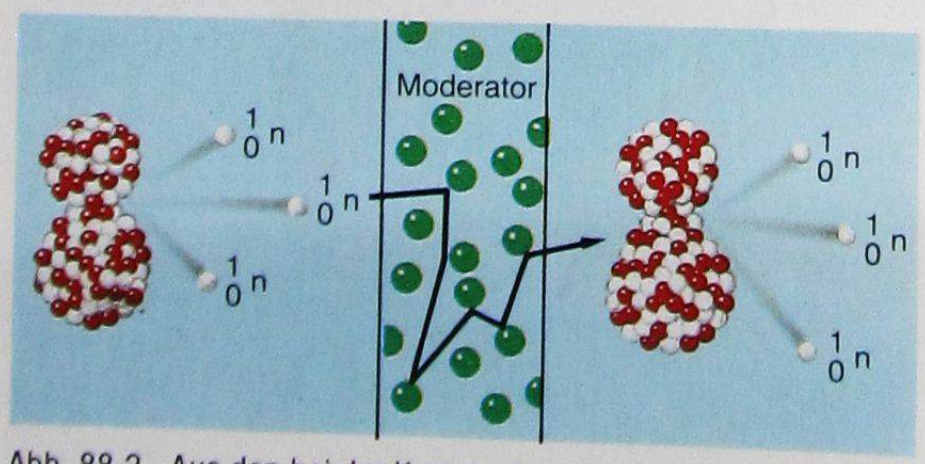


Abb. 88.2. Aus den bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen werden durch die Wechselwirkung (Stöße) mit den Moderatorteilchen langsame Neutronen.

7.3.5. Kernverschmelzung

Im Jahr 1929 stellte der russisch-amerikanische Physiker GEORGE GAMOW (1904 bis 1968) Vermutungen über die Energievorgänge in der Sonne an. Da die Sonne vollständig aus Wasserstoff und Helium besteht, vermutete er, dass sie ihre Energie aus der Umwandlung von Wasserstoffkernen in Heliumkerne bezieht. Er konnte diese Vermutung jedoch zunächst noch nicht beweisen. Es dauerte 9 Jahre, bis im Jahr 1938 der deutsch-amerikanische Physiker HANS ALBRECHT BETHE (geb. 1906) durch Laborexperimente und Überlegungen herausfand, wie die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen in der Sonne abläuft. Ähnliche Vorstellungen entwickelte unabhängig von BETHE der deutsche Physiker CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER (geb. 1912). Nach diesen beiden Wissenschaftlern wurde ein Ablauf bei der Kernverschmelzung als *Bethe-Weizsäcker-Zyklus* bezeichnet.

Bei der Kernspaltung (auch als *Fission* bezeichnet) wird ein schwerer Kern durch Neutronenbeschuss in zwei leichtere Kerne aufgespalten. Dabei tritt ein Masseverlust auf, der nach EINSTEIN direkt in Energie umgewandelt wird.

Bei der *Kernverschmelzung* (auch als *Kernfusion* oder kurz *Fusion* bezeichnet) geht man den umgekehrten Weg: Zwei leichte Kerne werden zu einem schweren Kern verschmolzen.

In der Sonne läuft ein derartiger Prozess ab. In ihrem Inneren herrschen Temperaturen von etwa 20 000 000 °C. Wenn die Materie derart heiß ist, kann man sie weder als fest, noch als flüssig oder gasförmig bezeichnen, man nennt sie **Plasma**. Im Plasma bewegen sich die Atome so schnell, dass sie sich beim Zusammenprall gegenseitig die Elektronen aus der Hülle schlagen, es entstehen also elektrisch positiv geladene Ionen und freie Elektronen. Nach außen verhält sich Plasma elektrisch neutral. Es wird oft auch als der vierte Aggregatzustand nach fest, flüssig und gasförmig bezeichnet. Im Inneren der Sonne besteht das Plasma größtenteils aus Wasserstoff. Da die Masse der Sonne ungeheuer groß ist, wird das

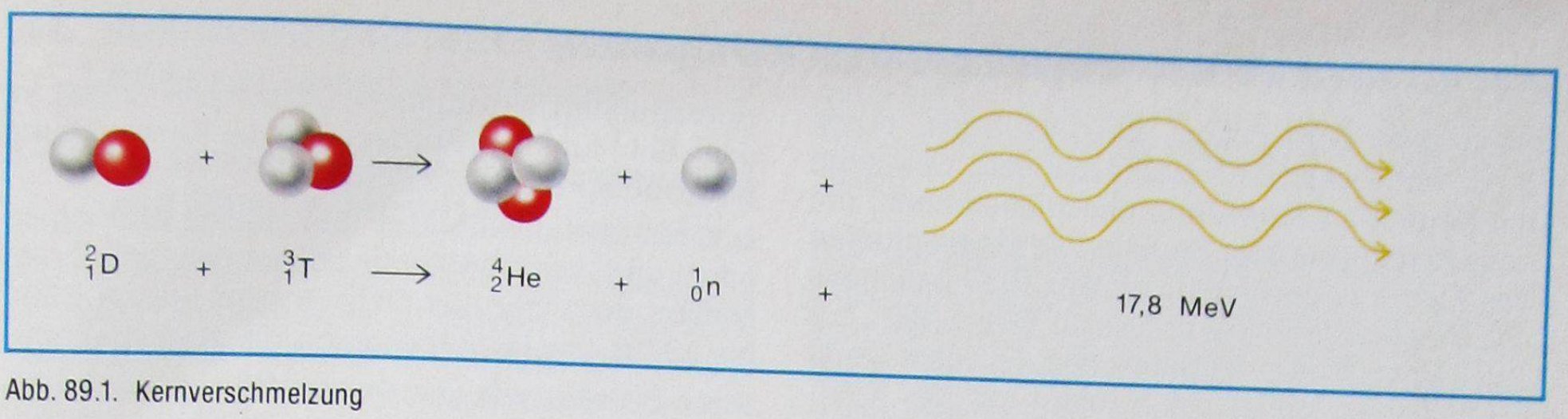


Abb. 89.1. Kernverschmelzung

Plasma durch die große Schwerkraft zusammengehalten.

Der Verschmelzungsprozess im Inneren, der Bethe-Weizsäcker-Zyklus, ist relativ kompliziert und läuft in sechs Stufen ab. Er kann hier nur angedeutet werden.

Zunächst verschmelzen ein Kern eines Kohlenstoff-Atoms (im Sonneninneren sind auch schwerere Kerne vorhanden) und ein Kern eines Wasserstoff-Atoms zu einem Kern eines Stickstoff-Atoms; die freigesetzte Bindungsenergie wird in Form von Gammastrahlung abgegeben.

Der Kern des Stickstoff-Atoms wandelt sich wieder in einen Kern eines Kohlenstoff-Atoms um, wobei Elementarteilchen abgestrahlt werden. Danach verschmilzt dieser Kern des Kohlenstoff-Atoms zunächst mit einem Kern eines Wasserstoff-Atoms zu einem Kern eines Stickstoff-Atoms, dieser mit einem weiteren Wasserstoffkern zu einem Sauerstoffkern, der allerdings wieder zu einem Stickstoffkern zerfällt. In der letzten Reaktion verschmilzt der letzte Stickstoffkern mit einem Wasserstoffkern zu einem Kohlenstoffkern und Heliumkern.

Bei allen Vorgängen wird Strahlung in Form von Teilchen oder Energiestrahlung freigesetzt. Auf diesem komplizierten Weg, bei dem der Kohlenstoffkern – wie wir es aus chemischen Reaktionen kennen – nur als Katalysator wirkt, werden vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmolzen.

In Laborexperimenten hat man erkannt, dass man schweren Wasserstoff (Deuterium) mit dem überschweren Wasserstoff (Tritium) zu Helium verschmelzen kann.

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{1}T \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17{,}8\ MeV$$

Mit Hilfe dieser Reaktion werden z. B. schnelle Neutronen erzeugt, mit deren Hilfe wiederum Kernspaltungen möglich sind.

Zusammenfassung

1. Radioaktive Stoffe wandeln sich durch Aussenden von α- oder β-Strahlung unter gleichzeitiger Abgabe von großer Wärme in andere Elemente um. Dabei kann auch γ-Strahlung abgegeben werden. Die Umwandlung setzt sich in einer Zerfallsreihe so lange fort, bis sich ein stabiles Isotop bildet.
2. Durch Neutronenbeschuss können natürlichen Elementen Radioisotope erzeugt werden oder Kerne gespaltet werden.
3. Die bei der Kernspaltung freiwerdende Wärme wird zur Energieerzeugung genutzt.
4. Bei der Kernfusion werden zwei leichtere Kerne zu einem schwereren verschmolzen, dabei wird Energie frei.

Aufgaben

1. Welche Vorgänge laufen bei einer Kernspaltung ab?
2. Was versteht man unter einer Kettenreaktion?
3. Erkläre den grundsätzlichen Vorgang bei einer Kernfusion.

Aus der Geschichte der Physik: Die erste Kernspaltung

Nach der Entdeckung des Neutrons durch CHADWICK (siehe S. 77) stellte man fest, dass man mit Neutronen Atomkerne beschießen kann, um neue Kenntnisse über Struktur und Eigenschaften des Atoms zu gewinnen. Im Jahr 1934 beschoss der italienische Physiker ENRICO FERMI (1901 bis 1954) Uran-Atome mit Neutronen. Er wollte damit herausfinden, ob es ein Element mit der Kernladungszahl 93, also um 1 höher als die Kernladungszahl des Urans, gibt. Die Ergebnisse dieses Neutronenbeschusses konnten jedoch nicht geklärt werden und erschienen zur damaligen Zeit verwirrend.

Zunächst arbeiteten der deutsche Chemiker OTTO HAHN (1879 bis 1968, *Abb. 90.1.* und *Abb. 90.2.*) und die österreichische Physikerin LISE MEITNER (1878 bis 1968, *Abb. 90.1.*) an der Entdeckung neuer radioaktiver Substanzen und entdeckten im Jahr 1917 das *Protactinium* das Element mit der Ordnungszahl 91. Wie FERMI versuchten sie, das Element mit der Ordnungszahl 93 zu finden, indem sie Uran mit Neutronen beschossen. Im Jahr 1938 musste die Jüdin LISE MEITNER aus Österreich nach Schweden flüchten, weil nach dem Anschluss Österreichs auch dort die antisemitischen deutschen Gesetze galten. HAHN arbeitete nun mit dem deutschen Chemiker FRITZ STRASSMANN (1902 bis 1980, *Abb. 90.2.*) zusammen. Bei ihren Versuchen fügten sie Barium hinzu, um eine ihrer Hypothesen zu bestätigen. Im nachhinein stellten sie jedoch fest, dass nach dem Neutronenbeschuss ein radioaktives Bariumisotop vorhanden war. HAHN vermutete deshalb, dass der Urankern in zwei Teile zerfallen war, wovon einer das radioaktive Bariumisotop war. Er zögerte zunächst, einen solchen unerhörten Gedanken zu äußern, veröffentlichte aber im Jahr 1939 seine Erkenntnisse, ohne jedoch auf die Kernspaltung einzugehen. OTTO HAHN erhielt im Jahr 1944 für seine Entdeckung der Kernspaltung den Nobelpreis für Chemie.

LISE MEITNER dachte über das gleiche Phänomen nach und veröffentlichte zusammen mit ihrem Neffen, dem Physiker OTTO ROBERT FRISCH (1904 bis 1979) ihre Hypothese von der Kernspaltung.

NIELS BOHR wurde von FRISCH über diese Neuigkeit informiert und verbreitete sie in den USA. In der Folgezeit arbeiteten amerikanische Wissenschaftler an der Beherrschung der nuklearen Kettenreaktion, denn das Ergebnis wäre eine Freisetzung von Energie mit einer hohen Sprengkraft im Bruchteil einer Sekunde, also die Atombombe.

Diese Entwicklung auf eine kriegerische Nutzung hin ist unter dem Aspekt des damals gerade ausgebrochenen 2. Weltkriegs zu sehen.

Im Jahr 1940 entdeckten die beiden amerikanischen Physiker EDWIN MATTISON MCMILLAN (geb. 1907) und PHILIP HAUGE ABELSON (geb. 1913) die beiden ersten Transurane, also Elemente mit einer Ordnungszahl höher als 92, „jenseits von Uran". Sie nannten sie *Neptunium* und *Plutonium*.

Am 2. Dezember des Jahres 1942 um 15.45 Uhr kam an der Universität von Chicago die erste *kontrollierte Kettenreaktion* in Gang und wurde wieder unterbrochen. Damit begann das *Atomzeitalter.* Als Folge dieses Versuchs konnte dann auch die erste Atombombe am 16. Juli 1945 auf einem Testgelände im US-Bundesstaat New Mexiko gezündet werden. Am 6. August 1945 und am 9. August 1945 wurden dann die *Atombomben* auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki geworfen. Eine der fürchterlichsten Vernichtungswaffen der Menschheitsgeschichte war entwickelt worden und sollte bis zum heutigen Tag das politische Geschehen mitbeherrschen.

Abb. 90.1. OTTO HAHN und ILSE MEITNER

Abb. 90.2. OTTO HAHN, FRITZ STRASSMANN und HEINZ HABER vor dem Experimentiertisch auf dem die 1. Kernspaltung erfolgte.

7.4. Gefahren und Nutzen der radioaktiven Strahlung

7.4.1. Strahlenbelastung, Strahlenquellen und Strahlenschäden

Seit BECQUEREL im Jahr 1896 die radioaktive Strahlung entdeckte, ist auch ihre schädigende Wirkung bekannt. Durch ein radioaktives Präparat, das er zwei Wochen lang in seiner Westentasche mit sich herumtrug, entwickelte sich eine geschwürartige Wunde, die sehr schlecht abheilte.

Aber bereits aus viel früheren Zeiten sind uns Hinweise auf die schädigende Wirkung radioaktiver Strahlung überliefert. Zu Beginn des 16. Jahrhunderts war das Erzgebirge eines der großen Bergbaureviere, in denen Silber abgebaut wurde. Zusammen mit Silber kommen Uranerze vor, und bereits aus dieser Zeit gibt es Hinweise auf eine Bergarbeiterkrankheit, bei der es sich nach neuesten Erkenntnissen um Lungenkrebs handelte, der durch radioaktive Strahlung hervorgerufen wurde.
Zentrum dieses Bergbaus war Joachimsthal, die Bergstadt, die dem Taler (eigentlich Joachimsthaler) und auch dem Dollar ihren Namen gab. Von Joachimsthal, dem heutigen Jakymov in Tschechien, stammt die Pechblende, an der MARIE CURIE, die einzige Wissenschaftlerin, die bisher zwei Nobelpreise erhielt, ihre Untersuchungen durchführte. In diesem Ort wurde nach dem 2. Weltkrieg auch Uran abgebaut.

Die Menschheit war also immer Strahlenbelastungen ausgesetzt, die je nach Gebiet natürlich unterschiedlich waren. Man unterscheidet dabei zwei Arten der Strahleneinwirkung: die **Strahleneinwirkung von außen**, die durch die *kosmische* (von der Sonne und aus dem Weltraum kommend) und durch die *terrestrische* (aus der Erdkruste kommend) Strahlung verursacht wird, und die **Strahleneinwirkung von innen**, die durch *Nahrungsaufnahme* und *Einatmen* radioaktiver Stoffe bewirkt wird. Diese Strahleneinwirkung von innen ist in der Regel meist gefährlicher als die Strahleneinwirkung von außen, da die radioaktiven Präparate in den Körper aufgenommen, dort eingelagert werden und dann längere Zeit wirken können.

Die **kosmische Strahlung** entsteht im Weltraum und auf bzw. in der Sonne und verursacht in den höheren Schichten der Erdatmosphäre Ionisationen.

Auch wenn ein großer Teil dieser Strahlung in der Atmosphäre abgefangen wird, gelangt doch ein Teil in abgeschwächter Form bis auf die Erdoberfläche.

Die **terrestrische Strahlung** wird durch radioaktive Mineralien in der Erdoberfläche verursacht. Je nach Gestein ist der Gehalt an solchen radioaktiven Mineralien unterschiedlich. Im Granit der alten Grundgebirge wie im Erzgebirge, im Fichtelgebirge oder im Bayerischen Wald ist er wesentlich höher als z. B. in Regionen mit Sedimentgesteinen wie Kalk- oder Sandstein, etwa in der Oberbayerischen Schotterebene oder im Norddeutschen Tiefland.

Da oftmals die Gesteine der Gebirge Baumaterialien lieferten, kann die Strahlenbelastung auch in den Häusern dieser Gebiete wesentlich höher sein. Es entsteht dabei das radioaktive Gas *Radon*, das vom Menschen eingeatmet werden kann. Die radioaktiven Zerfallsprodukte des Radons können dabei in der Lunge eingelagert werden und Lungenkrebs verursachen.

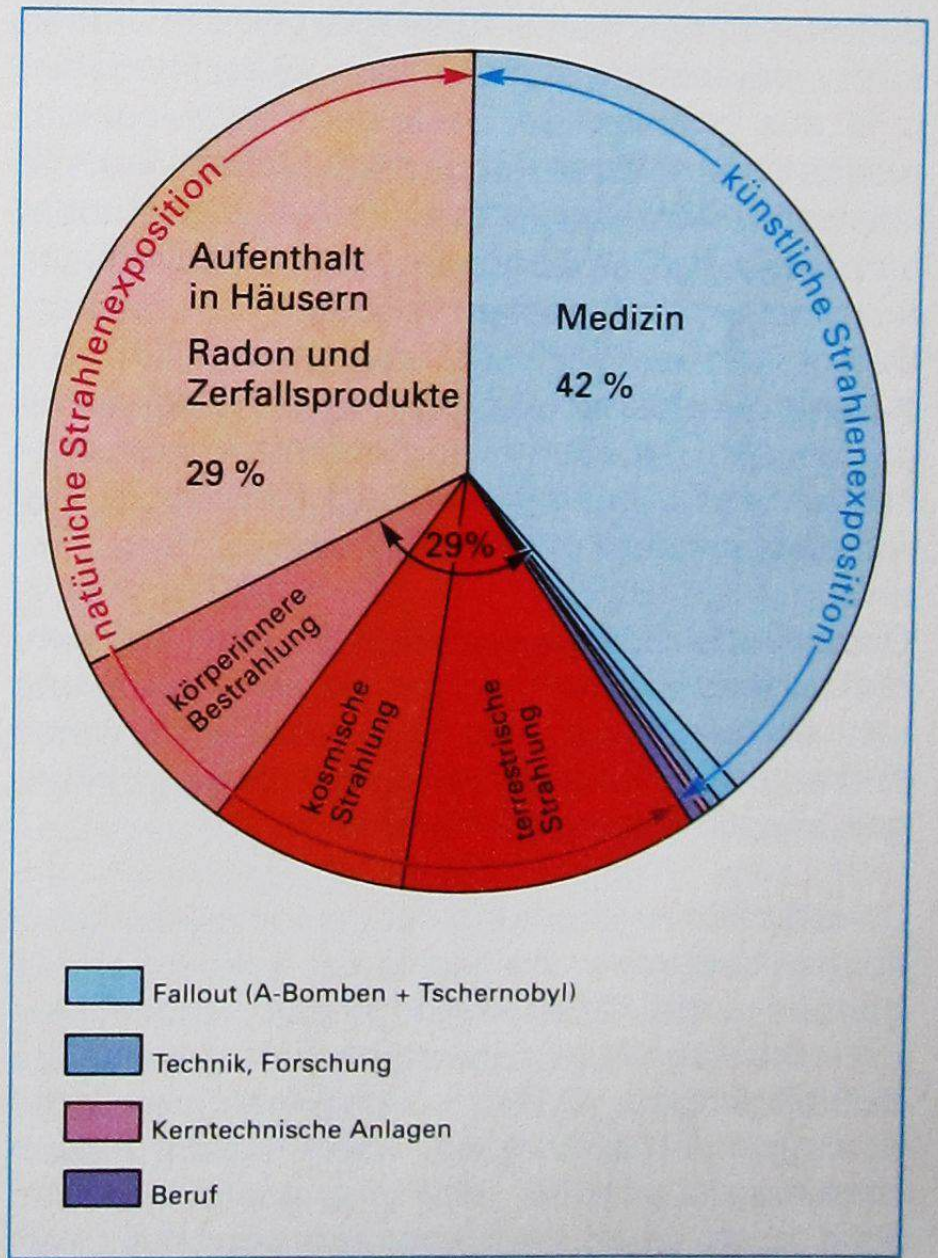


Abb. 91.1. Strahlenexposition der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland, aufgeschlüsselt nach verschiedenen Strahlenquellen

Abb. 92.1. Strahlenschäden an einer Hand

Die bisher angesprochenen Verursacher radioaktiver Strahlung zählen zu den **natürlichen Strahlenquellen**, die seit Beginn ihrer Existenz auf die Menschheit einwirken.

Weitere Strahlenexpositionen *(Abb. 91.1.)* wurden durch die technische Entwicklung bedingt, sind also durch **künstliche Strahlenquellen** verursacht. Man spricht dabei auch von der **Strahlenbelastung durch die Zivilisation**. Hier sind Emissionen aus Kohlekraftwerken (Kohle enthält auch radioaktive Substanzen), Baumaterialien (z. B. aus granitischen Gesteinen), Strahlenbelastungen bei Flügen in großen Höhen (wo die kosmische Strahlung wesentlich stärker ist) oder durch die industrielle bzw. landwirtschaftliche Nutzung von Phosphatprodukten zu nennen. Dazu kommt radioaktive Strahlung in der Medizin, z. B. bei der Bestrahlung eines Krebstumors, aber auch in der Umgebung von Kernkraftwerken oder infolge von Kernwaffenversuchen, die in der Atmosphäre durchgeführt wurden.

Obwohl die **Röntgenstrahlung** keine nukleare radioaktive Strahlung ist, ist sie der γ-Strahlung sehr ähnlich und hat ebenfalls eine ionisierende Wirkung. Sie hat deshalb dieselben Auswirkungen wie die radioaktive Strahlung.

Da radioaktive Strahlung Atome ionisieren kann, können dadurch im menschlichen Körper Schädigungen in den Zellen hervorgerufen werden. Man unterscheidet dabei **somatische** und **genetische Schädigungen**. Dabei spricht man von einer somatischen Schädigung, wenn nur die Person betroffen ist, die der Strahlung ausgesetzt war. Sind auch deren Nachkommen betroffen, liegt eine genetische Schädigung der Erbsubstanz vor. Somatische Schädigungen betreffen eine große Bandbreite von Wirkungen auf den Menschen; sie reichen von Mattigkeit und Unwohlsein über Hautschädigungen *(Abb. 92.1.)*, zeitweiligen Haarausfall, Blutbildveränderungen (Abnahme weißer Blutkörperchen) mit erhöhter Infektionsgefahr, Schädigung der Augen, Leukämie (Blutkrebs) und andere Krebsarten bis hin zum Tod. Ist das genetische Material betroffen, so können bei den Nachkommen Krankheiten (Erbkrankheiten) und Missbildungen auftreten, in extremen Fällen können sie auch lebensunfähig sein.

Der menschliche Organismus hat jedoch auch selbst wirksame Systeme entwickelt, mit denen Schäden in Zellen beseitigt oder Krebszellen entfernt werden können. Die Wirkung kleinster Strahlenmengen auf den Menschen, z. B. durch terrestrische und kosmische Strahlung auf der Erdoberfläche verursacht, scheint also kleiner zu sein, als zunächst angenommen wurde.

Die Probleme von Strahlenschäden liegen einerseits darin, dass diese häufig erst nach einer längeren Zeitspanne, also nach Wochen, Monaten oder sogar Jahren, auftreten und andererseits in der Tatsache, dass die radioaktive Strahlung von unseren Sinnen nicht erfasst werden kann.

7.4.2. Strahlenschutz

Auf Grund der vielfachen und vor allem sehr gefährlichen Schädigungen muss man sich vor radioaktiver Strahlung schützen. Diese Aufgabe wird für so wichtig erachtet, dass der Gesetzgeber für die Bundesrepublik Deutschland die „Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung", kurz *Strahlenschutzverordnung*, erlassen hat. Kern dieser Verordnung ist der § 28, in dem als allgemeines Schutzziel festgelegt wird, dass jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination (direkter Kontakt mit radioaktiven Stoffen) sowie Verunreinigung von Personen, Sachgütern oder der Umwelt mit radioaktiven

Abb. 92.2. a) Internationales Warnsymbol für radioaktive Strahlung, b) Geräteschild

Abb. 93.1. Dosimeter

Materialien zu vermeiden ist bzw. so gering wie möglich gehalten werden muss. Damit sollen die Gefahren auf ein vertretbares Maß beschränkt werden.

Diese Strahlenschutzverordnung enthält auch Vorschriften über die *Strahlenbelastung*, der Menschen ausgesetzt werden dürfen. Um diese Belastungen kontrollieren zu können, müssen Personen, die radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind, ein sogenanntes *Dosimeter (Abb. 93.1.)* tragen, in dem sich ein Filmmaterial befindet, das mit zunehmender aufgenommener radioaktiver Strahlenmenge immer schwärzer wird.

Abb. 93.2. Strahlenschutzanzüge

Geräte, die ionisierende Strahlung erzeugen, müssen mit einem Warnschild „Vorsicht! Radioaktiv!" gekennzeichnet sein, entsprechend gilt dies für radioaktive Substanzen.

Für alle Personen, die radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind oder mit radioaktiven Substanzen umgehen müssen, gelten die folgenden Grundregeln:

1. Die Bestrahlungsdauer ist so gering wie möglich zu halten. Deswegen verlässt z. B. die Röntgenassistentin beim Arzt den Raum während der Anfertigung einer Röntgenaufnahme, also während der Zeit, in der die Strahlung erfolgt.

2. Strahler sind möglichst gut abzuschirmen. Der Abstand von ihnen sollte möglichst groß sein. Vor allem die Augen sollte man vor Strahlenquellen schützen, da diese besonders schnell geschädigt werden können. Bei Geräten, die ionisierende Strahlung aussenden, wird deshalb die Strahlung durch besondere Vorrichtungen abgeschirmt, z. B. durch Bleiummantelungen oder Bleiglas. Arbeiter in Kernkraftwerken tragen besondere Schutzanzüge *(Abb. 93.2.)*, die allerdings nicht vor γ-Strahlung schützen.

3. In Räumen, in denen sich Strahlenquellen befinden, sollte man auf keinen Fall essen oder trinken.

4. Nach dem Umgang mit radioaktiven Strahlern sollte man sofort die Hände und alle Körperteile, die damit in Kontakt gekommen sind, gut reinigen.

7.4.3. Anwendungen der Radioaktivität

In der *Archäologie (Altertumsforschung)* lassen sich über radioaktive Isotope **Altersbestimmungen** durchführen. Da radioaktive Isotope z. B. in Pflanzen eingebaut werden, sinkt nach der Halbwertszeit der Gehalt an diesen Isotopen auf die Hälfte ab, nach einer weiteren Halbwertszeit auf ein Viertel usw. Man benutzt dazu das radioaktive Kohlenstoffisotop [$^{14}_{6}$C]-Kohlenstoff, nach dem die Altersbestimmung von Pflanzen- oder Lebewesenresten auch als C-14-Methode bezeichnet wird. Auf diese Weise kann man z. B. das Alter von Holzkohleresten bis auf 50 000 Jahre zurückbestimmen.

Mit das wichtigste Anwendungsgebiet findet sich in der Medizin. Hier wird radioaktive Strahlung sowohl für *diagnostische* (also untersuchende und erkennende) als auch für *therapeutische* (also heilende) **Zwecke** eingesetzt.

Bewährt hat sich die *Überprüfung der Schilddrüsenfunktion* mit Hilfe des radioaktiven Iodisotops [$^{131}_{53}$I]-Iod, das eine Halbwertszeit von 8 Tagen hat. Man gibt dem Patienten eine Nahrungsprobe, deren Gehalt an natürlichem Iod bekannt ist und die mit einem geringen Anteil an radioaktivem Iod versetzt ist. Durch Überprüfung mit Hilfe eines Zählrohrs kann man feststellen, wie viel radioaktives Iod in die Schilddrüse gelangt und daraus berechnen, ob die Schilddrüse normal funktioniert *(Abb. 86.2.)*.

Auch in der **Krebsbekämpfung** wird radioaktive Strahlung eingesetzt. Da Calcium und Strontium chemisch sehr ähnlich sind, kann radioaktives Strontium, das dem Körper zugeführt wurde, in das Knochengewebe eingebaut werden und dort Krebszellen zerstören. Man erspart dem Patienten damit gefährliche Operationen, setzt ihn aber auch den schädlichen Nebenwirkungen der Strahlung aus. Da man durch radioaktive Strahlung Zellen abtöten kann, wird sie auch zur Sterilisation eingesetzt, um Verbandmaterial und chirurgische Instrumente keimfrei zu machen.

Durch radioaktive Bestrahlung lässt sich das Erbmaterial in den Zellkernen verändern. In der **Gentechnik** wird dies gezielt zur Züchtung neuer Sorten eingesetzt. So hat man z. B. durch Bestrahlung die Erbsubstanz in Getreidekörnern verändert und widerstandsfähigere Sorten geschaffen.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die **Messtechnik**. Hier wird radioaktive Strahlung zur Dickenmessung und zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt. Man durchstrahlt den Werkstoff mit γ-Strahlung und misst deren Abweichungen von der Norm. Je nach Dicke der Schicht wird die Intensität der Strahlung gemessen. Risse oder Unregelmäßigkeiten verursachen unterschiedliche Absorptionen.

Zusammenfassung

1. Die Erde ist einer natürlich und einer künstlich verursachten Strahleneinwirkung ausgesetzt.
2. Die natürliche Strahleneinwirkung setzt sich aus der kosmischen Strahlung, die durch Vorgänge in der Sonne und im Weltraum verursacht wird, und der terrestrischen Strahlung, die auf der Emission radioaktiver Elemente in der Erdkruste beruht, zusammen.
3. Künstliche Strahleneinwirkung wird durch den Menschen infolge der von ihm hervorgerufenen technischen Entwicklung erzeugt. Dazu gehören Emissionen aus Kohlekraftwerken, aus Baumaterialien, aus der Nutzung von Phosphatprodukten, aus Kernkraftwerken und aus Atombombenversuchen.
4. In ihrer Wirkung auf den Menschen unterscheidet man Strahleneinwirkung von außen, bei der der Mensch Strahlungen ausgesetzt wird oder seine Hautoberfläche mit strahlendem Material in Berührung kommt, und Strahleneinwirkung von innen, bei der strahlende Partikel in den Körper durch Nahrung oder Atmung aufgenommen werden.
5. Radioaktive Strahlung kann bei Lebewesen und Pflanzen Schädigungen verursachen. Man unterscheidet somatische Schädigungen, bei denen nur die Person selbst geschädigt wird, und genetische Schädigungen, bei denen die Erbsubstanz verändert wird und die Schädigung erst an den Nachkommen sichtbar wird.
6. Auf Grund der Gefahren durch radioaktive Strahlung wurde in der Bundesrepublik Deutschland eine Strahlenschutzverordnung erlassen, die zum Ziel hat, die Strahleneinwirkung auf Menschen, Sachgüter und die Umwelt zu vermeiden oder so gering wie möglich zu halten.
7. Radioaktive Strahlung findet Anwendung bei der Altersbestimmung archäologischer Objekte, in der Medizin für diagnostische (z. B. Schilddrüsenuntersuchung) und therapeutische (z. B. Krebsbestrahlung) Zwecke sowie zur Sterilisation (Keimabtötung) von Verbandsmaterial und Instrumenten, in der Gentechnik zur gezielten Züchtung neuer Sorten und in der Messtechnik zur Dickenmessung und Werkstoffprüfung.

Aufgaben

1. Welche Strahleneinwirkungen von ihrer Entstehung her unterscheidet man?
2. Wie kann man Strahlung in ihrer Wirkung auf den Menschen unterscheiden?
3. Welche Maßnahme wurde zum Strahlenschutz geschaffen und was besagt sie?
4. Welche Grundregeln sollte man im Umgang mit radioaktiver Strahlung beachten?
5. Nenne Anwendungen der radioaktiven Strahlung.

8. Die Energieträger und die Auswirkungen ihrer Verwendung

Bis zur ersten *Ölkrise* im Jahr 1973 befasste sich die breite Öffentlichkeit wenig mit Energieproblemen, weder mit der Versorgungssicherheit noch mit den Auswirkungen auf die Umwelt bei der Energieumsetzung.

Nach der damals vorherrschenden Meinung bot die Kernenergie nahezu unerschöpfliche Reserven, wenn die Vorräte von Kohle und Erdöl wirklich einmal zur Neige gehen sollten. Auch für die Umweltbelastungen war das allgemeine Empfinden noch nicht geschärft; die Umweltbelastungen waren bis in die siebziger Jahre insgesamt auch geringer, weil bis dahin weniger Energie umgesetzt wurde.

Eine politisch begründete Maßnahme brachte den ersten Einschnitt in diesen relativ unbekümmerten Umgang mit Energie. Mehrere ölproduzierende Länder reduzierten freiwillig die Förderung von Erdöl. Dies löste in den westlichen Ländern die Ölkrise im Jahr 1973 aus (genauere Bezeichnung: die erste Ölpreiskrise; die zweite folgte im Jahr 1979). Um den Rohstoff Erdöl zu sparen, wurde ein Tempolimit von 100 $\frac{km}{h}$ auf allen Autobahnen bzw. 80 $\frac{km}{h}$ auf Landstraßen verordnet und ein allgemeines Sonntagsfahrverbot verhängt. Es folgten Appelle zum sinnvollen und sparsamen Gebrauch der kostbaren, immer teuerer werdenden Energie und gesetzliche Verordnungen zur Energieeinsparung in Wohnungen und Häusern. Es wurde allmählich klar, dass die bisher genutzten Energiequellen nur mehr im begrenzten Maß zur Verfügung stehen.

Etwa zeitgleich wurde ein zweiter Gesichtspunkt der Energienutzung immer stärker deutlich: die Folgen für die Umwelt. Die beobachteten Auswirkungen, wie z. B. das Waldsterben, häufig auftretende Allergien, konnten zwar den Ursachen nicht unmittelbar zugeordnet werden. Dass aber eine intensive Energienutzung das Umfeld des Menschen negativ beeinflussen kann, wurde kaum mehr geleugnet. Die Folgen waren die Einführung von bleifreiem Benzin, Katalysatoren in Autoauspuffen, eine noch andauernde Diskussion über ein allgemeines Tempolimit auf Autobahnen usw.

8.1. Grundbegriffe der Energiewirtschaft

Der Sprachgebrauch in der Energiewirtschaft weicht gelegentlich von dem in der Physik ab. Das kann historische Gründe haben: So spricht man von „Kraftwerken", obwohl es besser „Energiewerke" heißen sollte. Der Grund ist, dass man früher physikalische Begriffe ungenauer verwendet hat als jetzt und die Energie auch mit „Kraft" bezeichnet wurde. Ein weiteres Beispiel ist „Energieverbrauch" statt „Energieumwandlung" bzw. „Energieumsetzung". Man dachte dabei an die Energieträger, z. B. Kohle, die verbraucht werden, und nicht an die Energie, die sich nur von einer Form in eine andere umwandeln lässt.

Nach dem *Prinzip von der Erhaltung der Energie* lassen sich alle Energieformen ineinander umwandeln. Diese Möglichkeit wird vom Menschen seit alters her ausgenutzt. Zur Beschreibung dieser Umwandlungen unterteilt man die Energie in der Energiewirtschaft nach anderen Gesichtspunkten als in der Physik.

Ein erster Gesichtspunkt zur Gliederung ist die Stelle, an der die einzelnen Energieformen betrachtet werden:

1. Man spricht von **primären Energieträgern** oder **primärer Energie** und meint die ursprünglich („primär") in der Natur vorkommenden Energieträger: *Kohle, Brennholz, Erdöl* und *Erdgas, Wasser* und *Wind, Drehung der Erde, Uran.*

2. In Kraftwerken, Raffinerien usw. wird die primäre Energie in **Sekundärenergie** umgewandelt. Die Gründe für die Umwandlung sind meist bessere Transportmöglichkeiten und leichtere Verwendbarkeit. **Sekundäre Energieträger** sind z. B. *elektrischer Strom, Koks, Briketts, Stadtgas, Flüssiggas, Benzin, Heizöl.*

3. Als **Endenergie** bezeichnet man die Energie, die dem Verbraucher zur Verfügung steht. Das können Primärenergieträger, z. B. *Kohle, Erdgas* oder *Wasserenergie* (Mühlen) sein, aber auch Formen von Sekundärenergie: *Strom, Benzin, Stadtgas, Koks.*

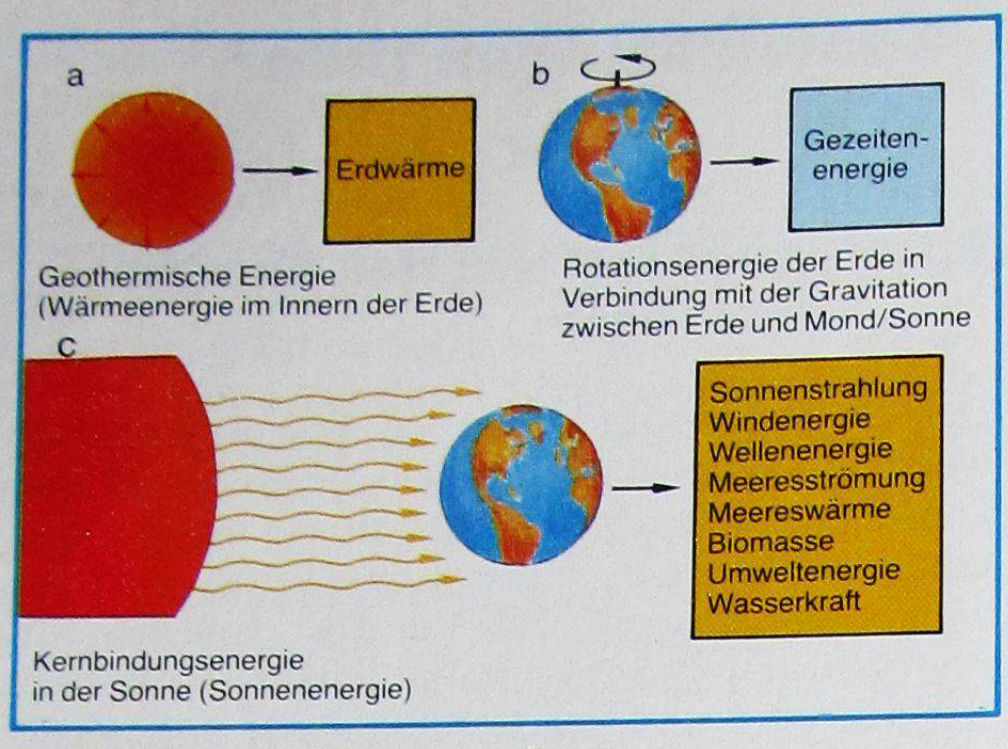


Abb. 96.1. Regenerative Energieträger

4. Beim Verbraucher wird die Endenergie in **Nutzenergie** umgewandelt, z. B. in elektrische Energie, in mechanische Energie beim Betrieb eines Aufzuges, in chemische Energie beim Verbrennen von Erdgas zum Kochen, in innere Energie.

Bei allen Energieumsetzungen treten mehr oder weniger große Verluste auf. Wird z. B. Steinkohle als Primärenergie für ein Wärmekraftwerk verwendet, dann werden nur etwa 40 % der chemischen Energie der Kohle in elektrischen Strom umgewandelt. Verwendet man den im Kraftwerk „erzeugten" elektrischen Strom zum Heizen einer Wohnung mit Nachtspeicheröfen, dann gehen nur ca. 80 % der elektrischen Energie in nutzbare innere Energie über. Wird dagegen die Steinkohle direkt als Endenergie in der Heizung verfeuert, dann hat man nur einmal einen Verlust von ca. 30 %, je nach Qualität der Heizungsanlage.

Zur Beschreibung der Umwandlung dient der **Wirkungsgrad**:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{genutzte Energie } W_{nutz}}{\text{aufgewendete Energie } W_{auf}}$$

Die Kohlkraftwerke haben also einen Wirkungsgrad von etwa $\eta = 40\,\%$.

Eine weitere Unterteilung charakterisiert den Bereich, aus dem die Energieträger kommen:

1. **Fossile Energieträger:** Kohle, Erdöl, Erdgas. Sie sind in frühen Erdzeitaltern aus organischen (pflanzlichen und tierischen) Ablagerungen entstanden.

2. **Kernenergie:** die Energie, die bei der Spaltung von schweren Atomkernen radioaktiver Elemente (Uran, Plutonium, Thorium) oder bei der Verschmelzung leichter Atomkerne z. B. von Wasserstoff-Atomen zu schwereren Atomkernen von Helium-Atomen frei wird.

3. **Regenerative Energiequellen:** *(Abb. 96.1.)* Sie erneuern sich – nach menschlichen Zeitmaßstäben gemessen – immer wieder oder stehen ständig zur Verfügung. Beispiele für die dazu gehörenden Energien sind Windenergie, Sonnenenergie (Sonnenkollektoren, Photozellen, Wärmepumpen), Meeresenergie (Gezeiten, Wellen), geothermische Energie, innere bzw. chemische Energie aus Biomasse.

Eine nach den Ursachen gegliederte Übersicht ist in *Abb. 96.1.* angegeben.
Manchmal spricht man hier ungenau auch von „alternativen Energien", wenn man den Gegensatz zu den „herkömmlichen Energien", z. B. zur fossilen Energie bzw. Kernenergie, betonen möchte.

Zusammenfassung

1. In der Energiewirtschaft unterscheidet man zwischen primären und sekundären Energieträgern, Endenergie und Nutzenergie, sowie zwischen fossiler Energie, Kernenergie und regenerativer Energie.
2. Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus genutzer Energie zu aufgewendeter Energie.

Aufgaben

1. Erkläre die Begriffe
a) primäre Energieträger,
b) sekundäre Energieträger,
c) Endenergie,
d) Nutzenergie.

2. Was sind fossile Energieträger?
3. Woraus entsteht Kernenergie?
4. Was sind regenerative Energiequellen? Nenne Beispiele.
5. Was beschreibt der Wirkungsgrad?

8.2. Energiebedarf und Energievorräte

Eine grundlegende Frage ist, wie lange sich die Menschheit noch mit Energie versorgen kann.

Dazu muss man den Weltenergiebedarf mit den Vorräten vergleichen. Die *Abb. 97.2.* zeigt die **Entwicklung des Weltverbrauchs an Primärenergie** vom Jahr 1875 bis zum Jahr 1995. Dabei bedeutet 1 t SKE (1 t Steinkohleeinheit) die Energie, die beim Verbrennen von 1 t Steinkohle frei wird, nämlich $29{,}3 \cdot 10^9$ J
= 1 Mrd. t SKE = $10^9 \cdot 29{,}3 \cdot 10^9$ J $\approx 30 \cdot 10^{18}$ J.

Man erkennt, dass der Weltenergieverbrauch ständig anwächst. Dieses Wachstum wird nur durch die beiden Weltkriege und die Krisen in der Weltwirtschaft unterbrochen. Über größere Zeiträume lässt sich das Wachstum annähern durch eine Verdopplung in jeweils 14 Jahren.

Nach der zweiten Ölkrise im Jahr 1979 erholte sich die Weltwirtschaft relativ schnell. Die Folge ist, dass der Bedarf ab dem Jahr 1983 wieder ansteigt.

Eine weitere Ursache des Wachstums ab dem Jahr 1983 ist die starke Zunahme der Bevölkerung in den Entwicklungsländern. Da diese Länder noch unzureichend mit Energie versorgt sind (ein Inder setzt etwa 500-mal weniger Energie um als ein Nordamerikaner), ist mit einem weiteren erheblichen Anwachsen des Weltenergiebedarfs zu rechnen.

Günstigere Zukunftsaussichten bieten die regenerativen Energiequellen und die Kernenergieträger. Die **Vorräte an Uran** (als „Brennstoff" für Kernkraftwerke, siehe Kap. 9.3., S. 108) reichen erheblich länger aus als die fossilen Energieträger, auch wenn der Anteil der Kernenergie an der Versorgung zunehmen würde. Darüber hinaus könnte man die Weltreserven an natürlich vorkommendem Uran unter Einsatz von schnellen Brütern noch erheblich besser ausschöpfen. Zur Zeit wird mit großem Aufwand daran geforscht, die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium zu nutzen. Sollte diese Anstrengung erfolgreich sein, wären die Energiereserven dank der riesigen Wasservorräte auf der Erde nahezu unerschöpflich.

Diese günstigen Aussichten bezüglich der Vorräte erklären die Euphorie, mit der man allgemein die Kernenergie bis vor etwa zwanzig Jahren betrachtet hat.

Dem steigenden Bedarf an Energie stehen **begrenzte Vorräte an fossilen Primärenergieträgern** gegenüber *(Abb. 97.3.)*.

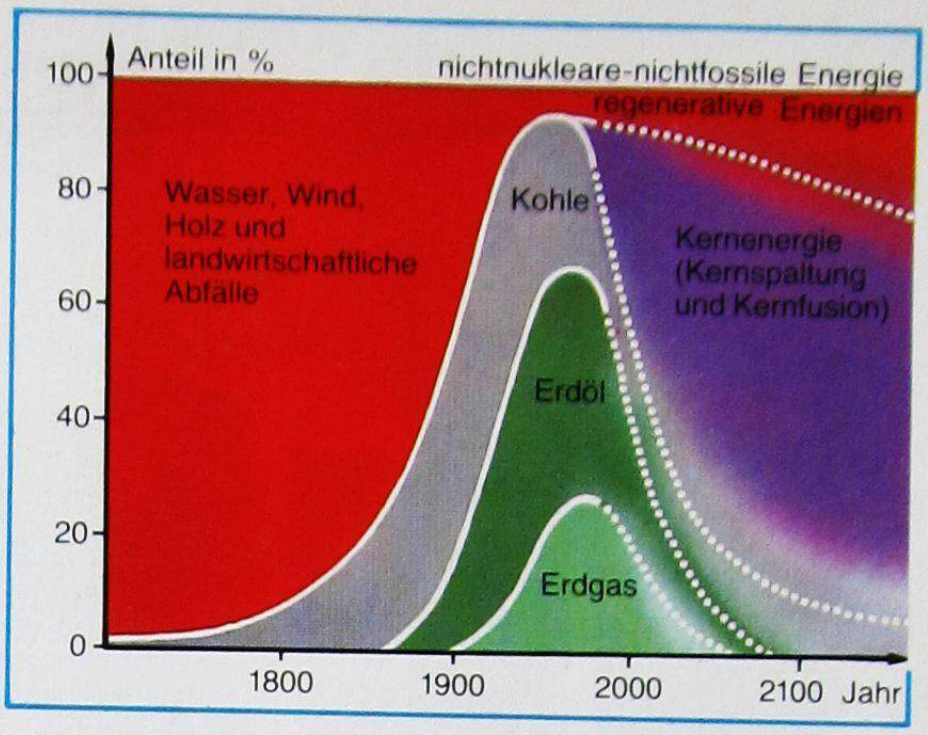


Abb. 97.1. Nutzung der Primärenergieträger in verschiedenen Zeitepochen

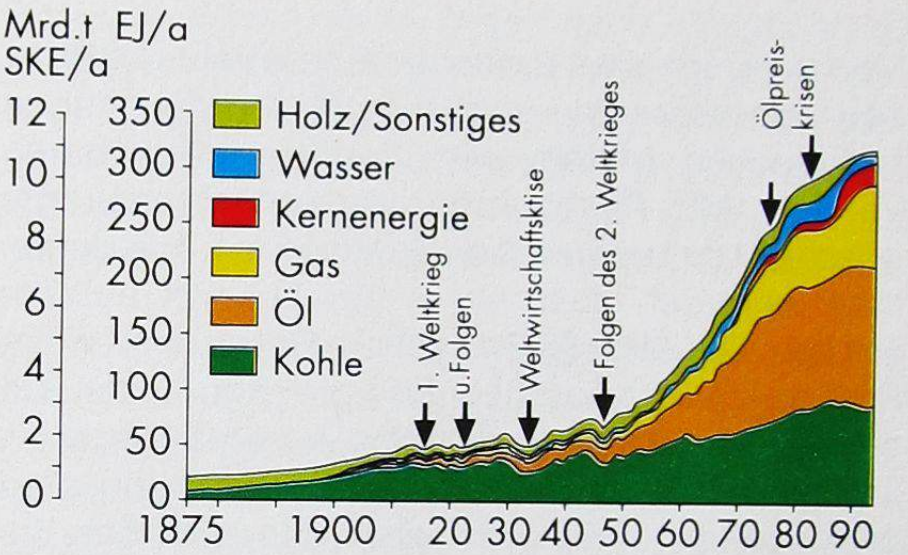


Abb. 97.2. Entwicklung des Weltenergieverbrauchs in den letzten 100 Jahren – Anteile der verschiedenen Primärenergieträger

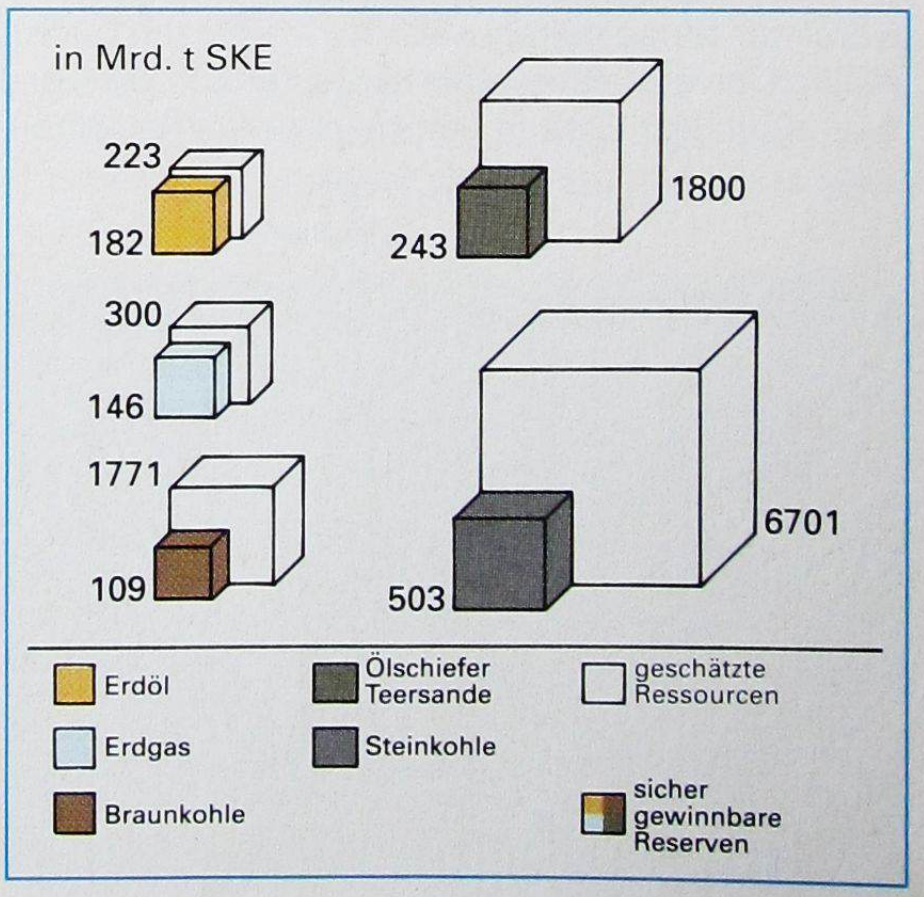


Abb. 97.3. Weltenergievorräte an fossiler Primärenergie

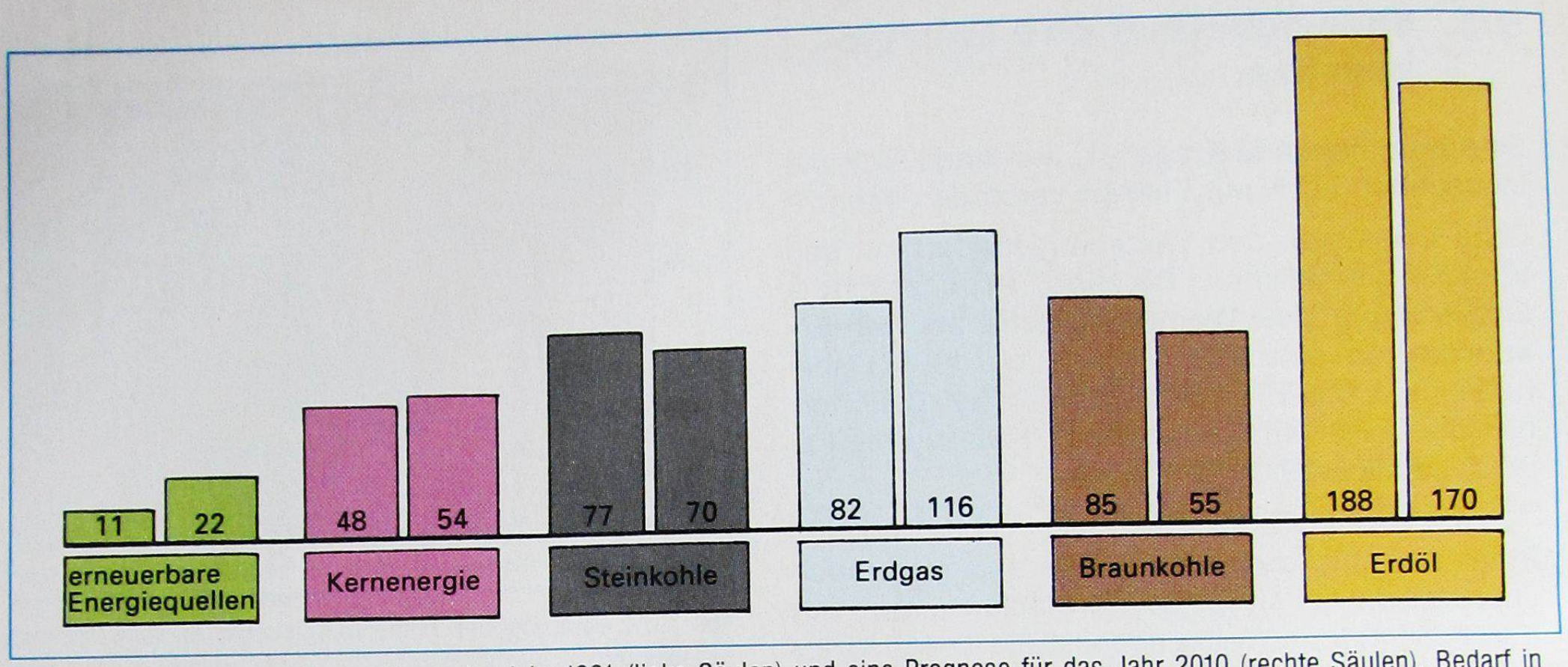


Abb. 98.1. Energiebedarf Deutschlands im Jahr 1991 (linke Säulen) und eine Prognose für das Jahr 2010 (rechte Säulen). Bedarf in Mio. t SKE

Man unterscheidet zwischen **Reserven** und **Ressourcen**: *Reserven* sind die mit den derzeitigen technischen Mitteln wirtschaftlich abbaubaren Vorräte. Mit *Ressourcen* bezeichnet man die geschätzten zusätzlichen Vorkommen, von denen man vermutet, dass sie in der Zukunft nutzbar werden. Die *Abb. 97.3.* stellt die Reserven und die Ressourcen an fossilen Energieträgern dar. Da sich die Einschätzung, welche Vorräte wirtschaftlich abbaubar sind, mit der Zeit ändern kann, sind die Angaben in *Abb. 98.1.* ebenfalls zeitabhängig. Trotzdem ergibt der Vergleich mit dem ständig wachsenden Weltenergiebedarf: Die Vorräte reichen, wenn die gegenwärtige Entwicklung anhält, nur noch wenige Jahrhunderte, wobei das Erdöl zuerst zur Neige gehen wird. Wir verheizen buchstäblich in vergleichsweise kürzester Zeit die Vorräte, die in der Erde in Jahrmillionen entstanden sind.

Die **regenerativen Energiequellen** sind im Prinzip unerschöpflich und wären deshalb für die Energieversorgung ideal geeignet. Ihre Anwendung ist aber mit einer Reihe von Problemen verbunden.

So steht die *Sonnenenergie* nur dann zur Verfügung, wenn die Sonne scheint, oder wenn es genügend hell ist *(Abb. 98.2.)*.

Windkonverter liefern nur dann ausreichend Energie, wenn der Wind genügend stark weht *(Abb. 98.3.)*.

Es sind deshalb unter anderem riesige Energiespeicher notwendig, die eine breite Anwendung erheblich verteuern. Außerdem benötigt man vergleichsweise riesige Flächen, um z. B. ein größeres Kohlekraftwerk durch Solarzellen zu ersetzen. Trotzdem scheinen die regenerativen Energiequellen langfristig den einzig möglichen Ausweg aus dem Versorgungsdilemma zu bieten.

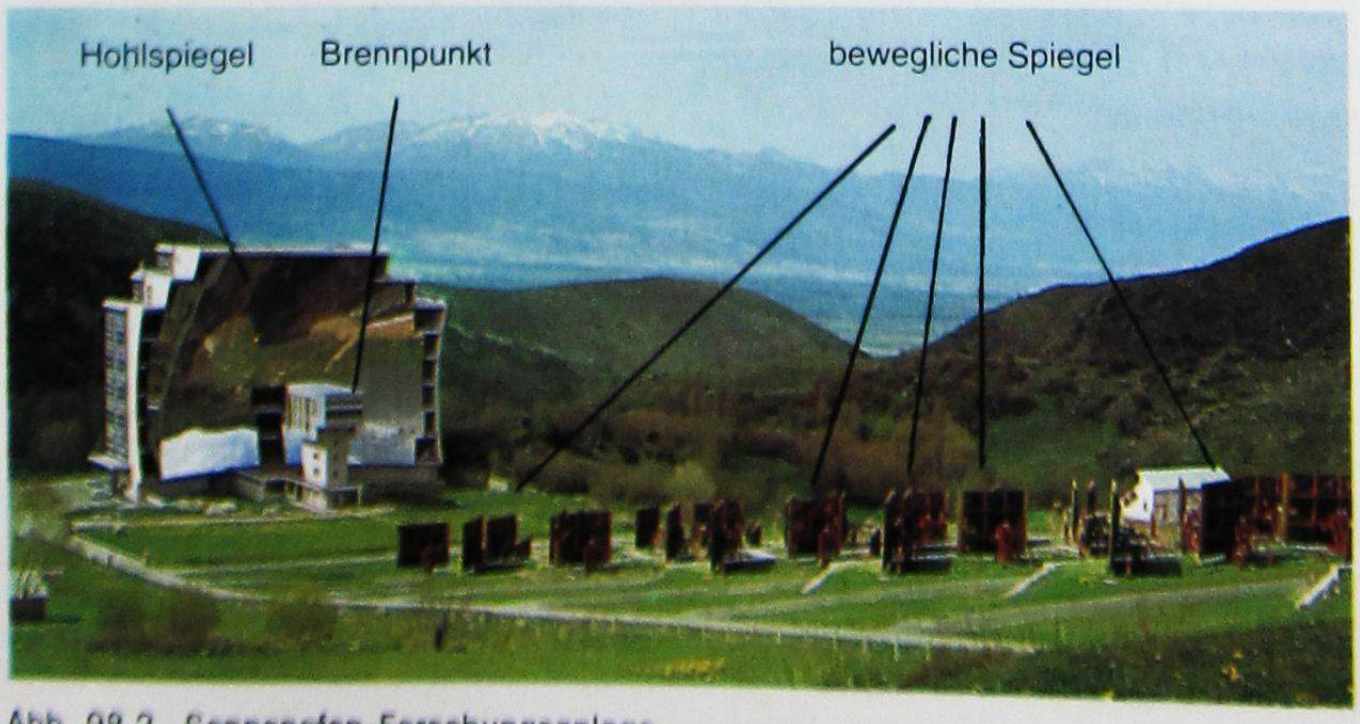


Abb. 98.2. Sonnenofen-Forschungsanlage

Abb. 98.3. Windkonverter

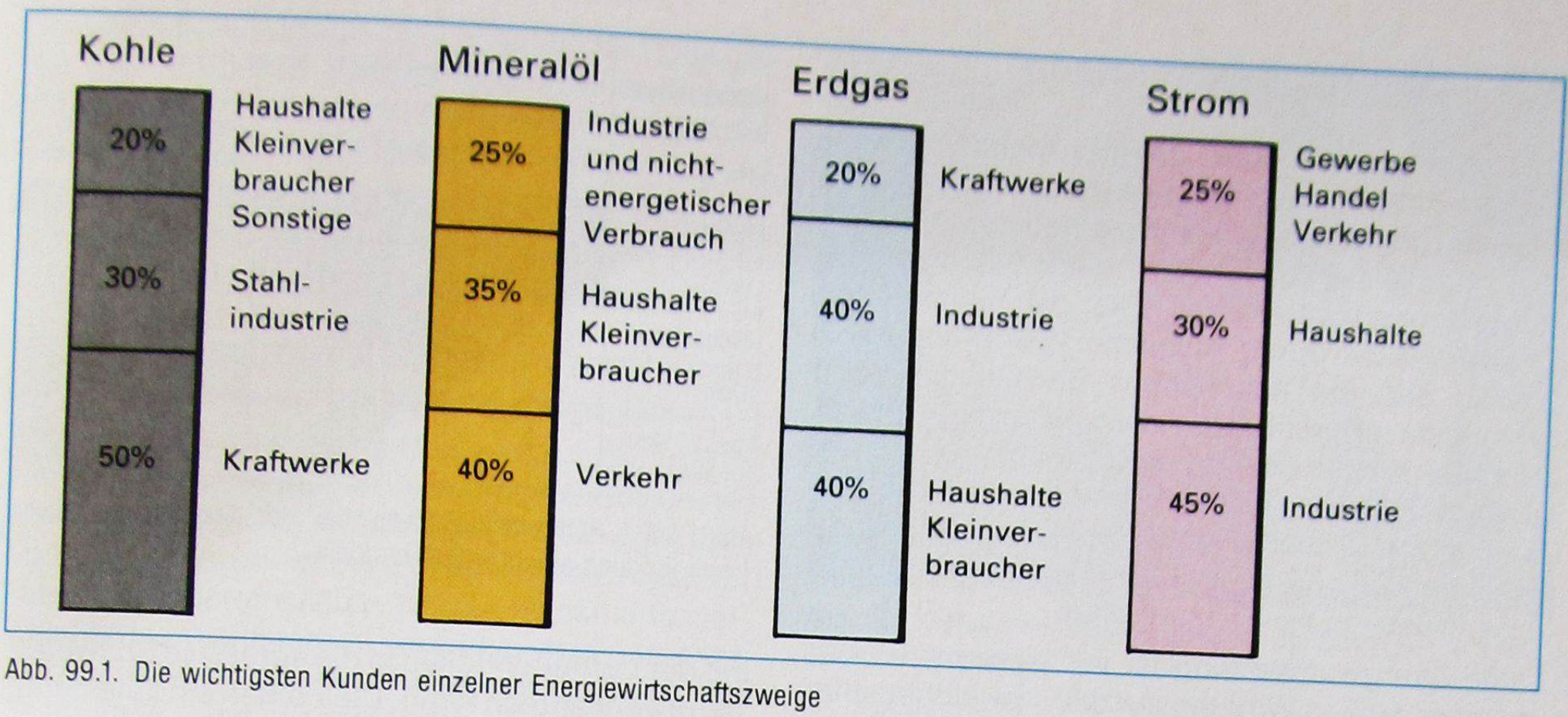


Abb. 99.1. Die wichtigsten Kunden einzelner Energiewirtschaftszweige

Die **Entwicklung des Primärenergiebedarfs in Deutschland** *(Abb. 98.1.)* zeigt, wie bei anderen hochindustrialisierten Ländern, in der letzten Zeit Unterschiede zu der Entwicklung des Weltbedarfs. Der Bedarf stagniert bzw. sinkt, weil die Primärenergie wegen des technischen Fortschritts immer besser genutzt wird und die Maßnahmen zur Einsparung wirksam werden. Das kann man insbesondere am Verbrauch von Erdöl erkennen. Außerdem tragen die milden Winter der letzten Jahre zur Einsparung bei.

Ein weiterer Grund des stagnierenden Energieumsatzes in Deutschland ist die Umstrukturierung der Wirtschaft. Im zunehmenden Maße wandern energieintensive Betriebe ins Ausland ab.

So wird Bauxit nicht mehr nach Deutschland geliefert, um hier mit großem Aufwand an elektrischer Energie in Aluminium umgewandelt zu werden. Die Förderländer erzeugen das Aluminium selbst, meist mit erheblich weniger Rücksicht auf die Umwelt und exportieren es nach Deutschland.

Die Aufteilung des Endenergieumsatzes auf die einzelnen Verbrauchergruppen ist in *Abb. 99.1.* dargestellt. Diese Angaben sind ebenfalls von der wirtschaftlichen Umstrukturierung abhängig. Die privaten Haushalte haben dabei zur Zeit mit etwa einem Drittel einen erheblichen Anteil am Energieumsatz; ein wesentlicher Teil wird dabei zum Heizen verwendet. Beim Einsparen von Energie ist somit jeder Einzelne gefordert.

Zusammenfassung

1. Der Weltbedarf an Primärenergie steigt etwa alle 14 Jahre auf das Doppelte. Dieses Wachstum wird nur durch Weltkriege und Wirtschaftskrisen unterbrochen.
2. Die Vorräte an fossilen Energieträgern sind begrenzt.
3. Für die Kernenergie gibt es nahezu unerschöpfliche Vorräte.
4. Die intensive Nutzung der regenerativen Energiequellen bringt noch Probleme; langfristig sind sie aber der einzige Weg zu einer sicheren Energieversorgung.

Aufgaben

1. a) Erkläre die Einheit 1 t SKE.
b) Wieviel J sind 1 t SKE?
2. a) Wieviel t SKE sind 1 EJ?
b) Wieviel kWh sind 1 EJ? (1 kWh = 3,6 MJ).
3. Beschreibe die Entwicklung des Weltbedarfs an Primärenergie.
4. Was bezeichnet man bei den Vorräten an Energieträgern mit Reserven, was mit Ressourcen?
5. Welche Probleme bezüglich der Versorgung ergeben sich, wenn man die fossilen Energieträger weiterhin so intensiv nutzt wie bisher?
6. Wie sieht es mit der Versorgungssicherheit mit Kernenergie aus?
7. Nenne Probleme, die sich zur Zeit bei der Nutzung von regenerativen Energiequellen ergeben.
8. Beschreibe die Entwicklung des Primärenergiebedarfs in Deutschland und gib Gründe für diese Entwicklung an.

8.3. Umweltbelastungen

Mit dem ersten Feuer, das die Menschen entfachten, haben auch die Umweltbelastungen und Risiken begonnen, wie wir sie heute sehen: Die Rauchgase verschmutzten die Luft, u. a. mit krebserregenden Stoffen und die Feuerstätten stellten, etwa durch mögliche Waldbrände, ein Risiko dar. Ein historisches Beispiel für weitreichende menschliche Wirkungen auf die Umwelt sind die Küsten des Mittelmeeres. Sie waren vor etwa 2000 Jahren bewaldet und haben erst durch den menschlichen Einfluss, durch die Rodung und die Holzgewinnung, die heutige verkarstete bzw. wüstenhafte Form erhalten.

Jede Energieumsetzung ist mit einer mehr oder weniger großen Wirkung auf die Umwelt begleitet *(Abb. 100.1.)*. Die Energieumsetzungen sind aber eine entscheidende Voraussetzung unserer Zivilisation; ohne sie wären z. B. die dichten Besiedlungen von vielen Gebieten der Erde nicht möglich. Es gilt deshalb zu erreichen, die Umweltbelastungen bei den Energieumsetzungen möglichst klein zu halten, zumindest aber auf ein erträgliches Maß zu bringen.

Die Wirkungen menschlicher Eingriffe auf die Umwelt sind vielfältig (*Abb. 100.2.* bis *Abb. 100.4.*). Sie belasten die Luft, das Wasser, den Boden, das Klima und verändern die Landschaft. Im Folgenden sollen Beispiele von Wirkungen gegeben werden, die zur Zeit öffentlich diskutiert werden.

Die **Luft** wird vor allem durch Verbrennungsprodukte belastet (*Abb. 100.3.* und *Abb. 100.4.*). Kohle und Erdöl können größere Mengen Schwefel enthalten. Bei der Verbrennung wird daraus *Schwefeldioxid*, das sich über weitere Reaktionen

Primär-energieträger	Belastung der Umwelt durch:							
	SO_2	Staub	NO_x	CO	C_mH_n	Radio-aktivität	CO_2	Ab-wärme
Kohle	■	■	■	■	■	■	■	■
Erdöl	■	■	■	■	■		■	■
Erdgas			■	■			■	■
Uran						■		■
Sonne, Wind, Laufwasser								■

Abb. 100.1. Umweltbelastungen bei der Energieumwandlung (ohne Wertung aus quantitativer Sicht)

mit der Luftfeuchtigkeit in die agressive *Schwefelsäure* verwandeln kann. Die Folgen sind vielfältig; sie reichen von Atembeschwerden über einen negativen Einfluss auf das Pflanzenwachstum (Waldsterben) bis zur Zerstörung von historischen Baudenkmälern (Steinfraß, *Abb. 100.2.*).

Abb. 100.2. Apostel aus dem Fürstenportal des Bamberger Doms. Links im Jahr 1907 aufgenommen, rechts im Jahr 1990.

Abb. 100.3. Vom Menschen verursachte Schadstoffquellen: Industrie, Verkehr, Kraftwerke, Handwerk, Haushalte

Abb. 100.4. Vom Menschen verursachte Schadstoffquelle: Brennende Ölfelder nach dem Golfkrieg im Jahr 1991

Schwefeldioxid spielte eine wesentliche Rolle bei der größten bisher bekannt gewordenen Smogkatastrophe, bei der im Dezember des Jahres 1952 in London 4000 Menschen den Tod fanden.

Durch Änderung der Heizungstechnik, Reduzierung des Schwefelgehaltes in Kohle und Heizöl hat man erreicht, dass Smogkatastrophen wie in London nicht mehr auftreten können. Moderne Kraftwerke enthalten aufwendige Vorrichtungen zur Entschwefelung der Verbrennungsgase.

Die Wirkung des *Schwefeldioxids* wird durch *Stickoxide* verstärkt, die überall dort auftreten, wo Verbrennungen mit hoher Temperatur ablaufen, vor allem in Automotoren und in Kraftwerken für fossile Brennstoffe *(Abb. 100.3.)*. Stickoxide werden für das Waldsterben verantwortlich gemacht. Gegenmaßnahmen sind Katalysatoren in den Auspuffen von Kraftfahrzeugen und Entstickungsanlagen für die Verbrennungsgase von Kraftwerken. Durch eine geeignete Steuerung bzw. Führung des Verbrennungsvorgangs kann man erreichen, dass weniger Stickoxide entstehen.

Unter ungünstigen Umständen kann durch Stickoxide *Ozon* gebildet werden, das Atemwegs- und Kreislauferkrankungen bei Menschen hervorruft.

Weitere Schadstoffe, die durch menschliche Einwirkungen, insbesondere bei Verbrennungsvorgängen, in die Luft gelangen können, sind *Stäube (Abb. 100.3.* und *Abb. 101.1.)* und *radioaktive Substanzen.* Stäube können giftige Stoffe mit sich führen und unter anderem die Entstehung von Krebs fördern, wenn sie in die Lunge geraten. Abhilfe bringen Staubfilter in Industrieanlagen, die jedoch die feinsten Staubteilchen nur schlecht zurückhalten können. Da radioaktive Substanzen in geringer Konzentration überall auf der Erde zu finden sind, gelangen sie auch von der Kohle in die Verbrennungsgase und tragen zu einer geringen, aber messbaren Erhöhung der natürlichen Radioaktivität bei.

Zum Schutz der Bevölkerung werden die Schadstoffe in der Luft ständig überwacht. Durch Gesetz sind maximal zulässige Werte für ihre Konzentration festgelegt. Werden diese sogenannten *Immissionsgrenzwerte* überschritten, dann lösen die zuständigen Behörden *Smogalarm* aus. Die Bevölkerung wird benachrichtigt, und es werden Maßnahmen getroffen, die bis zur Beschränkung des Kraftfahrzeugverkehrs und des Betriebs von Industrieanlagen führen können.

Die bei der Verbrennung fossiler Primärenergieträger freigesetzten Schadstoffe werden auch durch natürliche Vorgänge gebildet.

Abb. 101.1. Natürliche Schadstoffquelle: Ausbruch des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991

So können bei Vulkanausbrüchen *(Abb. 101.1.)* neben Staub so große Mengen Schwefeldioxid in die obere Atmosphäre geschleudert werden, dass die Einflüsse auf der ganzen Erde messbar sind.

Der Ausbruch des Vulkans El Chichon in Mexiko Ende März 1992 senkte die globale Temperatur der nördlichen Halbkugel der Erde über einen längeren Zeitraum um 0,3 °C, bis 0,4 °C ab, und mehrere große Vulkanausbrüche zu Beginn des 17. Jahrhunderts hatten zur Folge, dass zu dieser Zeit im Juli noch Schnee fiel. Diese natürlichen Einflüsse auf die Umwelt dürfen jedoch nicht dazu führen, die von Menschen verursachten Schäden auf die leichte Schulter zu nehmen.

Die **Schadstoffbelastung der Gewässer** (*Abb. 102.1.* und *Abb. 102.2.*) ist in erster Linie auf die Abwässer aus den Haushalten und Industrieanlagen zurückzuführen. Werden landwirtschaftliche Flächen zu stark gedüngt, um die Erträge zu steigern, dann kann auch dies, vor allem durch Nitrate, zu einer nennenswerten Belastung beitragen. Da jedoch die gesetzlichen Auflagen immer strenger geworden sind, hat die Schadstoffbelastung der Gewässer, vor allem durch den Einsatz wirkungsvoller Kläranlagen, in der letzten Zeit abgenommen; man findet in Flüssen, die früher biologisch tot waren *(Abb. 102.2.)*, wieder Wassertiere. Aber auch die besten gesetzlichen Auflagen können nicht ganz verhindern, dass Unfälle in Industrieanlagen größere Verseuchungen der Abwässer hervorrufen.

Durch die Abführung der Abwärme tragen die Kraftwerke selbst nur im geringen Maße zur Belastung von Flüssen bei, da die Vorschriften bezüglich der Temperaturerhöhung relativ streng sind. Die Abwärme wird in erster Linie in Kühl-

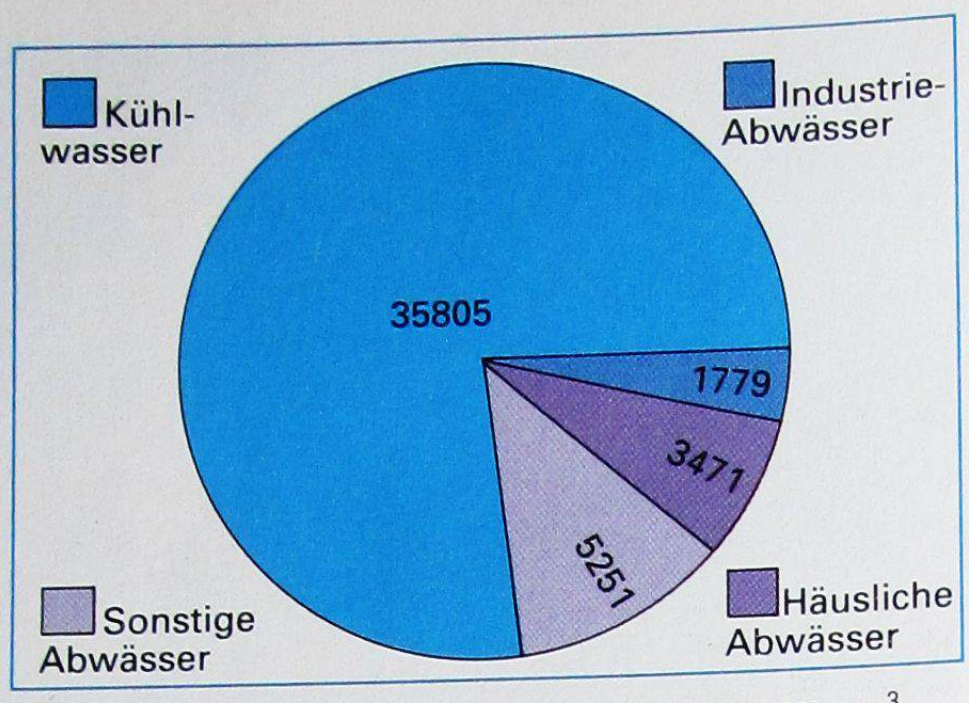


Abb. 102.1. Menge und Herkunft des Abwassers in Mio. m^3

türmen an die Luft abgegeben. Indirekt können aber Energieumsetzungen durchaus an einem Einfluss auf die Gewässer beteiligt sein: Beim Kohlebergbau müssen große Wassermengen weggepumpt werden, damit die Schächte beim Untertagebau bzw. die Gruben beim Tagebau trocken gehalten werden; die Produktion von Energieumwandlern, und auch die massenhafte Herstellung von Solarzellen kann die Abwässer der Industrieanlagen nennenswert schädigen.

Die **Belastungen des Bodens** durch menschliche Eingriffe haben mehrere Ursachen: Schwefeldioxid und Stickoxide reagieren mit der Luftfeuchtigkeit zum sog. *sauren Regen.* Dieser saure Regen gelangt in den Boden und bewirkt zusammen mit der *Überdüngung* eine Bodenversauerung. Die Wurzeln der Pflanzen werden geschädigt. Die Folgen sind ein verarmtes Pflanzenwachstum und eine Mitschuld am sogenannten Waldsterben *(Abb. 102.3.).* Durch großflächiges Abholzen der Wälder verliert die wertvolle Humusschicht ihren Halt und wird von Stürmen abgetragen (Winderosion). Eine weitere Folge ist die Verkarstung der Gebiete. Unsachgerechte Lagerung von Giftstoffen und Unfälle können den Boden nachhaltig schädigen.

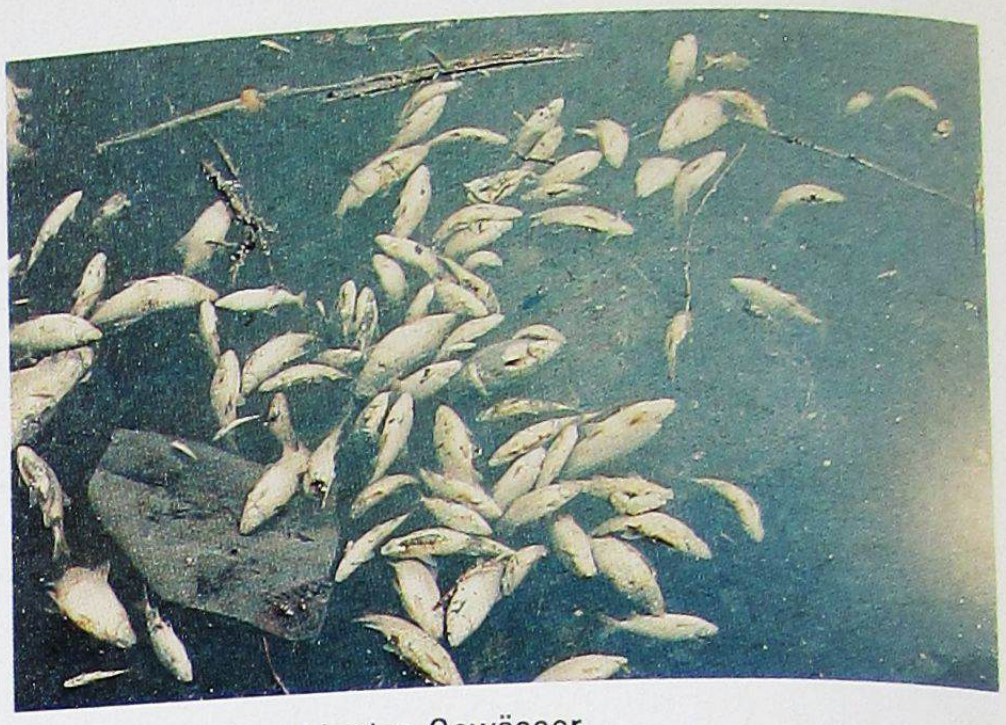


Abb. 102.2. Umgekipptes Gewässer

Die wahrscheinlich größte Katastrophe der letzten Jahre hatte den Kernreaktorunfall in Tschernobyl als Ursache. Der Boden der umliegenden Gebiete wurde in einem so hohen Maß radioaktiv verseucht, dass mehrere hunderttausend Menschen umgesiedelt werden mussten und diese Gebiete auf längere Zeit unbewohnbar bleiben.

Der Einfluss der menschlichen Energieumsetzungen auf die **Landschaft** sind vielfältig. Kohle-oder Kernkraftwerke haben einen vergleichsweise begrenzten Flächenbedarf und gleichen in ihrem Aussehen etwa mittelgroßen Industriebetrieben.

Die Bergwerksanlagen zur Förderung von Kohle, Erdöl und Uran können aber schon landschaftsverändernden Charakter annehmen, der bis zur großflächigen Absenkung ganzer Landstriche reicht *(Abb. 102.4.).*

Abb. 102.3. Sterbender Wald

Abb. 102.4. „Industriewüste"

Laufwasserkraftwerke verändern durch ihre Stauanlagen Flusslandschaften; die Staudämme von Speicherseen können einerseits unberührte Bergtäler versinken lassen andererseits ganze Gebiete touristisch aufwerten. Bei einer intensiven Nutzung von Sonnen- und Windenergie ist der vergleichsweise große Flächenbedarf zu berücksichtigen. Um beispielsweise den gesamten Bedarf an elektrischer Energie ausschließlich durch Solaranlagen zu decken, müsste man etwa 2 % der gesamten Fläche in Deutschland damit bedecken.

Die menschlichen Eingriffe auf das **Klima der Erde** stellen nach den gegenwärtigen Annahmen die größte Gefahr für die Umwelt in den nächsten Jahrhunderten dar. Die gesamte von Menschen umgesetzte Energie wird letztendlich in Wärme umgewandelt. Diese *Wärmebelastung* erreicht jetzt schon in den Innenbereichen von Großstädten die Größe der Energieeinstrahlung der Sonne; für das gesamte Ruhrgebiet sind es immer noch etwa 10 % der Sonneneinstrahlung. Die daraus resultierende Erwärmung ist zwar lokal, d. h. in begrenzten Gebieten feststellbar, stellt aber global, d. h. für die ganze Welt, noch keine Gefahr dar. Wächst aber die Energieumsetzung weiter so schnell wie bisher (Verdopplung alle vierzehn Jahre), dann wird die Wärmebelastung nicht mehr vernachlässigbar sein.

In der langen Zeit der Erdgeschichte hat der natürliche *Treibhauseffekt* ein Temperaturgleichgewicht von global etwa 15 °C eingestellt, was die Erde erst bewohnbar macht. Wie das Glasdach eines Treibhauses lässt die Atmosphäre das Sonnenlicht relativ ungehindert hindurch, hält aber die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche in den Weltraum im hohen Maße zurück. Die Folge ist global eine höhere mittlere Temperatur. Verantwortlich sind die *Treibhausgase*, geringe Anteile von *Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, Methan*

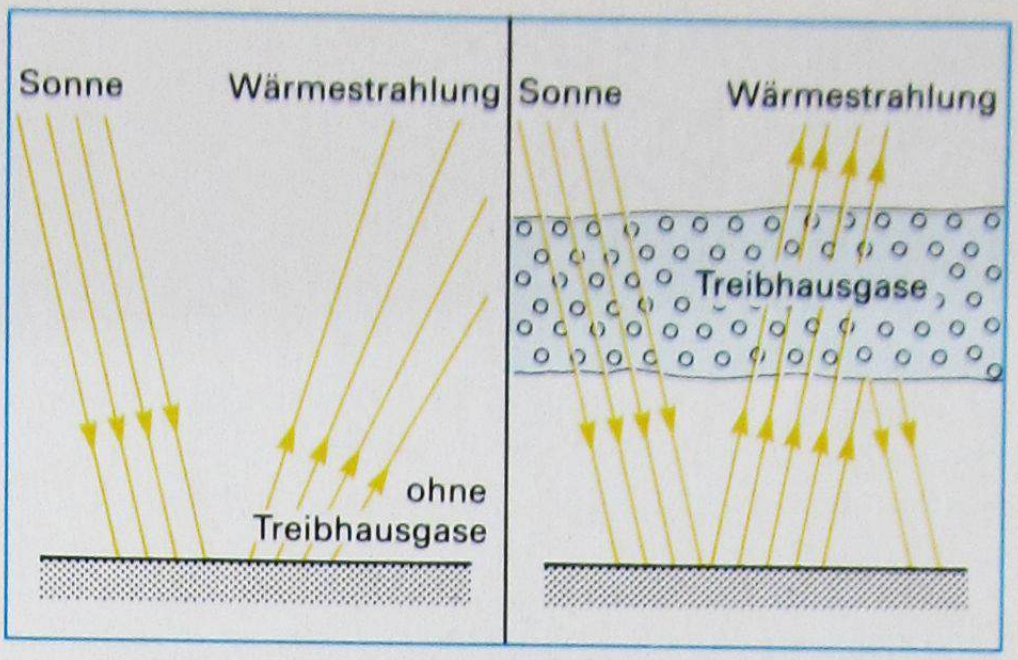


Abb. 103.1. Treibhauseffekt

usw. in der oberen Atmosphäre. Dieses empfindliche Gleichgewicht ist durch natürliche Einflüsse immer wieder einmal verändert worden. Die Temperatur auf der Erde nahm innerhalb weniger Jahrhunderte um mehrere Grad zu oder ab, mit zum Teil katastrophalen Auswirkungen, wie z. B. während der *Eiszeiten.*

Nun besteht aber die Gefahr, dass der natürliche Treibhauseffekt durch menschliche Einflüsse nachhaltig erhöht wird. Dies geschieht durch zusätzliche Freisetzung von Treibhausgasen. In erster Linie sind dies die großen Mengen an *Kohlenstoffdioxid*, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe zusätzlich in die Atmosphäre gelangen; aber auch die Schädlichkeit anderer Gase, wie *Fluorchlorkohlenwasserstoffe* (FCKW), die in der chemischen Industrie und als Kühlmittel verwendet werden, ist nachgewiesen. Man versucht durch Computerrechnungen mit immer komplizierteren Programmen, die Folgen dieses künstlichen Treibhauseffekts vorauszusagen. Die Aussagen dieser Rechnungen sind nicht gesichert; die Tatsache, dass der durch Menschen hervorgerufene Anteil des Treibhauseffekts die Lebensbedingungen auf der ganzen Welt nachhaltig verschlechtert, ist aber unbestritten.

Zusammenfassung

Durch menschliche Einflüsse können die Luft, die Gewässer, der Boden, die Landschaft und das Klima der Erde negativ beeinflusst werden.

Aufgaben

1. Nenne die Schadstoffbelastungen der Luft.
2. Nenne die Schadstoffbelastung der Gewässer.
3. Welche menschlichen Eingriffe können den Boden belasten?
4. Welche Veränderungen der Landschaft sind auf menschliche Einflüsse zurückzuführen?
5. Welchen Einfluss hat die Wärmebelastung bei Energieumsetzungen?
6. a) Was ist der Treibhauseffekt?
b) Wodurch wird der Treibhauseffekt hervorgerufen?
7. Stelle die Umwelteinflüsse des Menschen auf einem Blatt zusammen, links die Ursachen (Kohlenverbrennung, . . .), in der Mitte die Schadstoffe (Schwefeldioxid, . . .) und rechts die Bereiche, in denen sich die Einflüsse auswirken (Luft, . . .).

9. Kraftwerke

9.1. Wasserkraftwerke

Zur Zeit stellt die Wasserkraft in Deutschland die bedeutendste regenerative Energiequelle dar. Sie wird durch die Strahlung der Sonne verursacht, die den natürlichen Wasserkreislauf in Gang hält. Früher standen Mühlen, Pumpen, Sägewerke und Hammerschmieden an den Bächen und Flüssen, um die Wasserkraft direkt zu nutzen; heute erzeugen *Speicherkraftwerke (Abb. 104.1.)* meist an künstlich aufgestauten Seen und *Laufwasserkraftwerke (Abb. 104.2)* an Flüssen elektrische Energie, die sich überall hin transportieren lässt.

In Deutschland wird die Wasserkraft weitgehend ausgeschöpft; es gibt kaum mehr Gelegenheiten, neue Wasserkraftwerke zu bauen. Dagegen bieten sich vor allem in den Entwicklungsländern noch viele Möglichkeiten, diese umweltfreundliche Energiequelle zu nutzen.

Typische **Speicherkraftwerke** haben den in *Abb. 104.3.* dargestellten Aufbau: In einem Stausee wird das Wasser gesammelt, um von den momentanen Niederschlägen unabhängig zu sein; man kann die elektrische Energie je nach Bedarf erzeugen. Das Wasser wird durch eine Druckleitung *(Abb. 104.3.)* über eine möglichst große Höhe in das Maschinenhaus zugeführt. Dort treibt es über eine Turbine einen elektrischen Generator an.

Laufwasserkraftwerke nutzen das Wasser in Flüssen und Strömen. Durch Staustufen, die Schleusen für Schiffe enthalten können, erzielt man eine geringe Höhendifferenz zwischen Wasserzulauf und Wasserablauf *(Abb. 104.4.)*. Der Wasserdurchlauf kann stark jahreszeitlich schwanken; er sollte möglichst groß sein.

Abb. 104.1. Speicherkraftwerk

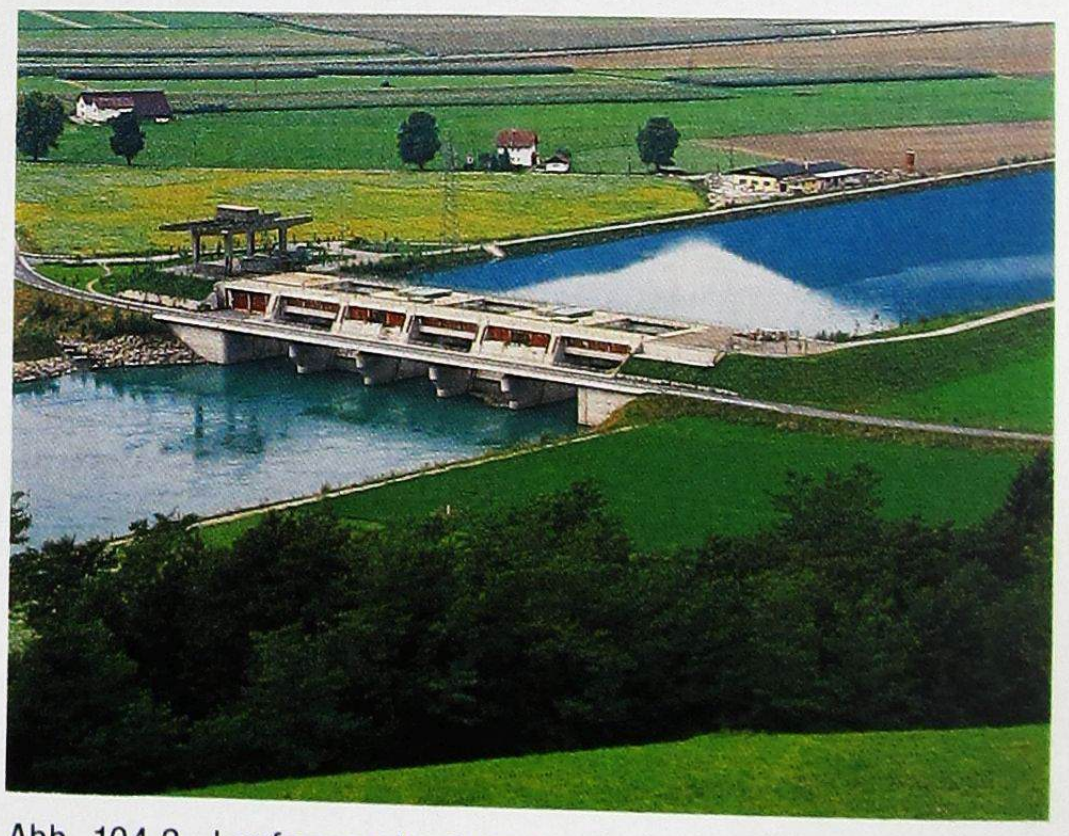


Abb. 104.2. Laufwasserkraftwerk

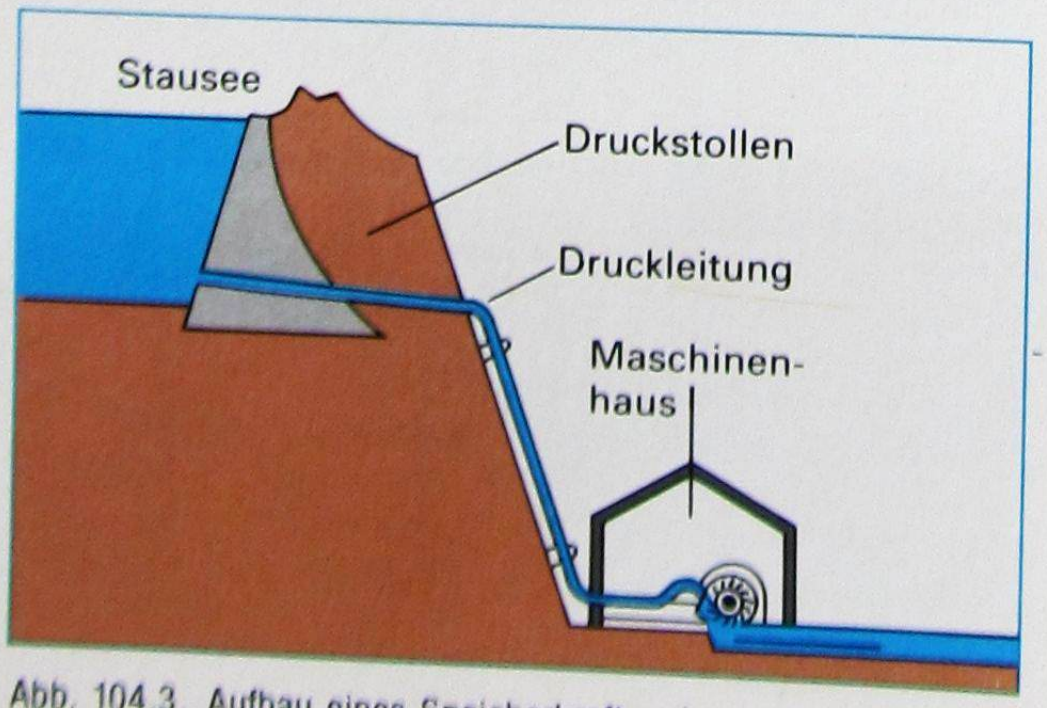


Abb. 104.3. Aufbau eines Speicherkraftwerks

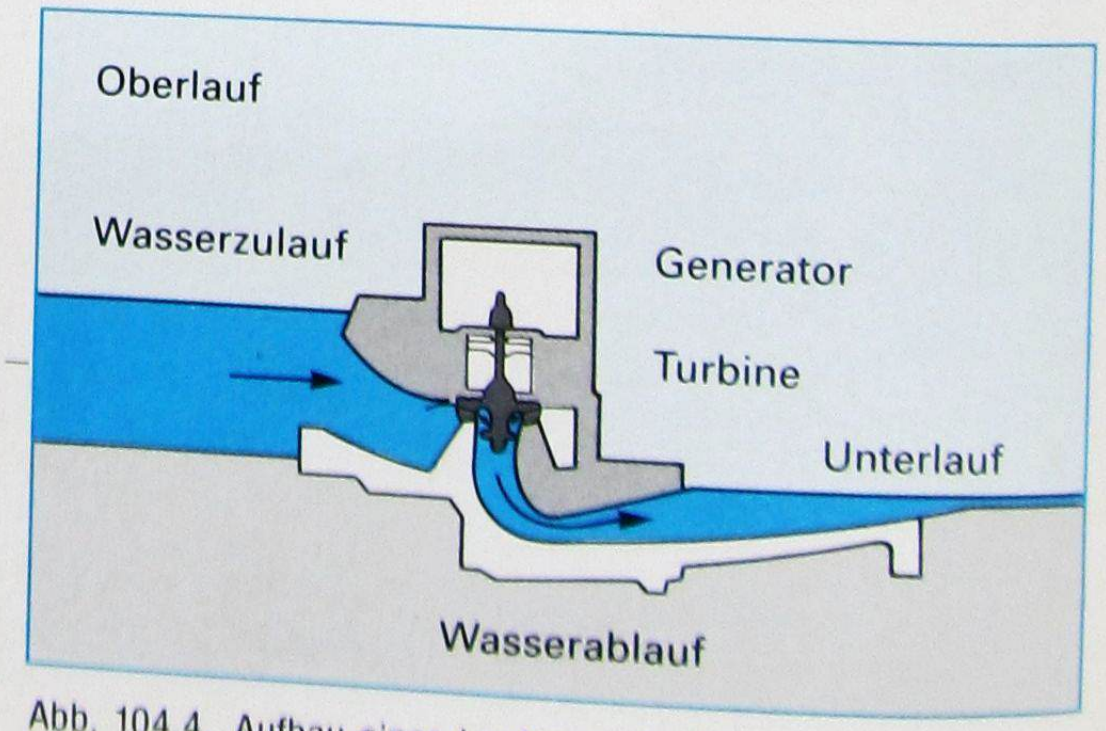


Abb. 104.4. Aufbau eines Laufwasserkraftwerks

Pumpspeicherkraftwerke *(Abb. 105.1.)* haben zusätzlich die Möglichkeit, bei geringem Bedarf (meist nachts) die überflüssige Energie anderer Kraftwerke zu nutzen, indem sie Wasser in den Speichersee zurückpumpen. Bei erhöhtem Verbrauch (meist an Werktagen vormittags) wandeln sie dann die Lageenergie des Wassers wieder in elektrische Energie um.

Gezeitenkraftwerke *(Abb. 105.2.)* nutzen den Wechsel der Gezeiten. Bei Flut werden Rückhaltebecken mit Wasser gefüllt, das bei Ebbe über Turbinen ins Meer zurückläuft. Letztendlich stammt die Energie aus der Drehung der Erde und nicht von der Strahlung der Sonne. Die Drehenergie der Erde ist aber so ungeheuer groß, dass die Länge des Tages dadurch auch nach Jahrhunderten nicht größer wird.

Gezeitenkraftwerke arbeiten nur dort wirtschaftlich, wo der Höhenunterschied zwischen Ebbe und Flut genügend groß ist *(Abb. 105.2.)*.

Wasserkraftwerke arbeiten ohne Abgabe von Schadstoffen und belasten die Umwelt nur durch die Eingriffe in die Landschaft. Ihr Wirkungsgrad ist mit 80 % bis 90 % recht groß.

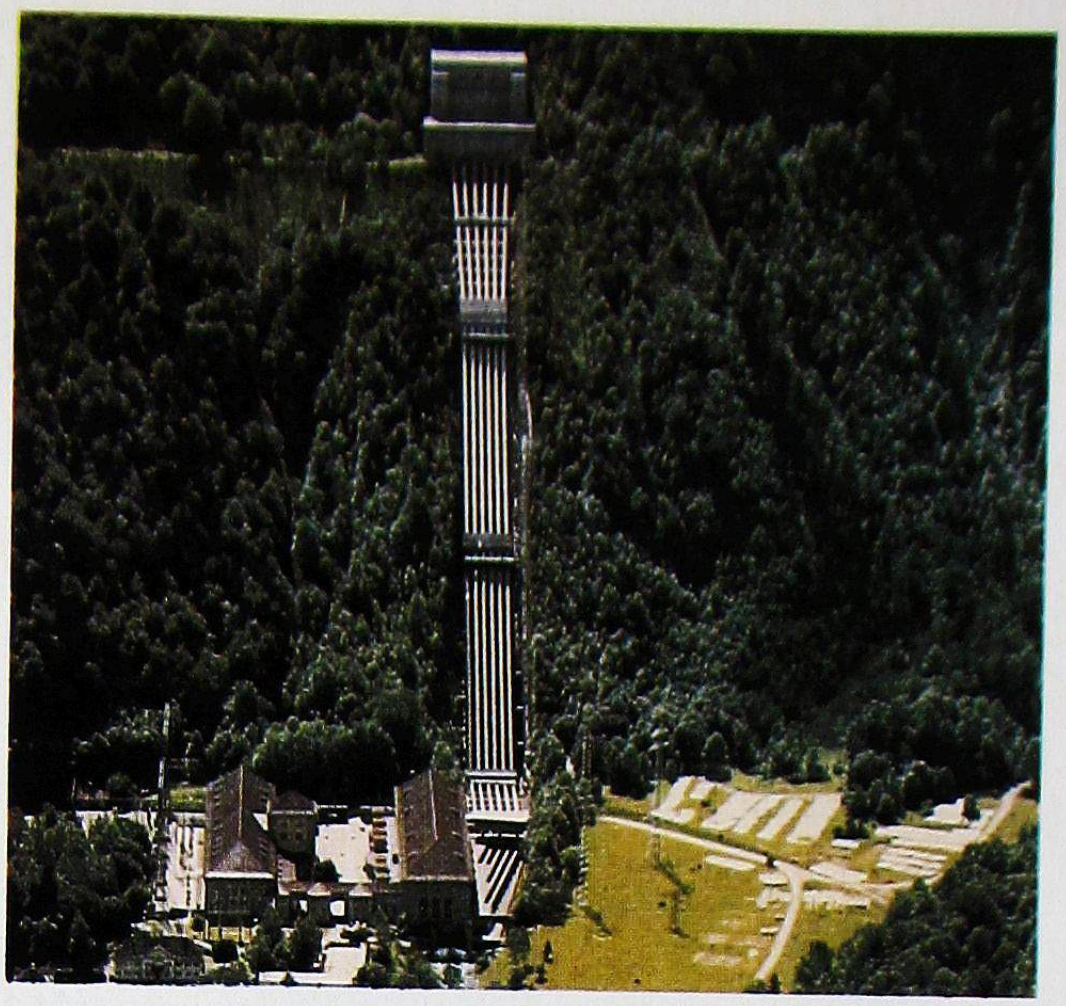


Abb. 105.1. Pumpspeicherkraftwerk Walchensee

Abb. 105.2. Gezeitenkraftwerk in der Rance-Mündung bei St. Malo in Frankreich

Aufgaben

1. a) Erkläre die Wirkungsweise eines Speicherkraftwerks.
b) Welche Energieumwandlungen finden in einem Speicherkraftwerk statt?
2. Erkläre die Wirkungsweise eines Laufwasserkraftwerks.
3. Welche Funktion hat ein Pumpspeicherkraftwerk?
4. Wie funktioniert ein Gezeitenkraftwerk?
5. Durch das Donaukraftwerk Jochenstein fließen pro Sekunde 2000 m^3. Die Fallhöhe beträgt 8,0 m. Welche elektrische Leistung gibt es bei einem Wirkungsgrad von 85 % ab?

Zusammenfassung

1. Wasserkraftwerke wandeln die Lage- bzw. Bewegungsenergie des Wassers umweltschonend in elektrische Energie um.

2. Es gibt Speicher-, Pumpspeicher-, Laufwasser- und Gezeitenkraftwerke.
3. Der Wirkungsgrad von Wasserkraftwerken ist 80 % bis 90 %.

9.2. Wärmekraftwerke

Wärmekraftwerke wandeln die innere Energie, die in heißen Gasen bzw. Dämpfen steckt, in elektrische Energie um. Das Erhitzen kann durch Verbrennen fossiler Stoffe (Kohle, Heizöl, Erdgas) oder durch Kernreaktionen erfolgen. Im letzten Fall spricht man von Kernkraftwerken.

Aus einem physikalischen Grundgesetz folgt, dass die Umwandlung von innerer Energie der Gase bzw. Dämpfe in mechanische Energie nur teilweise erfolgen kann. Der Wirkungsgrad der Umwandlung ist umso größer, je stärker die Abkühlung des Gases bzw. des Dampfes ist.

Dampfkraftwerke *(Abb. 106.2.)* erzeugen aus den heißen Verbrennungsgasen zunächst Wasserdampf mit möglichst hoher Temperatur (bis 540 °C) und möglichst großem Druck (bis 250 MPa). Dieser Dampf strömt durch eine Turbine *(Abb. 106.3.)*. Druck und Temperatur nehmen dabei stark ab; ein Teil der inneren Energie wird in der Turbine in mechanische Energie umgewandelt. Im angeschlossenen Generator entsteht schließlich die elektrische Energie. Der abgekühlte Wasserdampf wird im Kondensator zu Wasser, das mit Hilfe der Speisewasserpumpe wieder dem Dampferzeuger zugeleitet wird. Der Kondensator gibt dabei viel innere Energie bei niedriger Temperatur frei; sie muss an einen Fluss oder in einem Kühlturm an die umgebende Luft abgegeben werden.

Bei **Gasturbinenkraftwerken** wird, wie bei den Düsenantrieben von Flugzeugen, der „Umweg" über den Wasserdampf vermieden. In ihnen wird ein Gemisch aus Verbrennungsgasen und heißer Luft direkt über die Schaufeln der Turbine geleitet *(Abb. 106.1.)*. Die Luft wird vor der Verbrennung verdichtet; damit erreicht das Gas-Luft-Gemisch Drucke bis zu 1,5 MPa und Temperaturen bis 1100 °C. In der Turbine entspannt sich das Gemisch auf Atmosphärendruck und kühlt sich auf etwa 500 °C ab.

Damit die Verbrennungsgase die Turbinenschaufeln nicht zu sehr beanspruchen, müssen die Brennstoffe besonders sauber sein. Ohne besondere Vorkehrungen ist dies nur bei Erdgas und bei leichtem Heizöl der Fall. Die hohen Temperaturen erfordern auch besonders widerstandsfähige Materialien für die Brennkammer und die Turbinenschaufeln (Chrom-Molybdän-Legierungen) und eine ausgefeilte Kühlung.

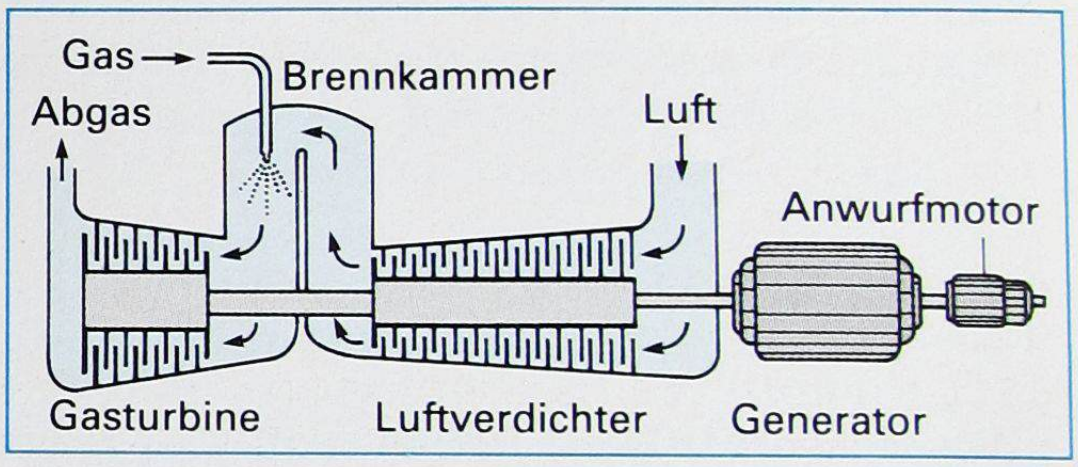


Abb. 106.1. Prinzip einer Gasturbinenanlage

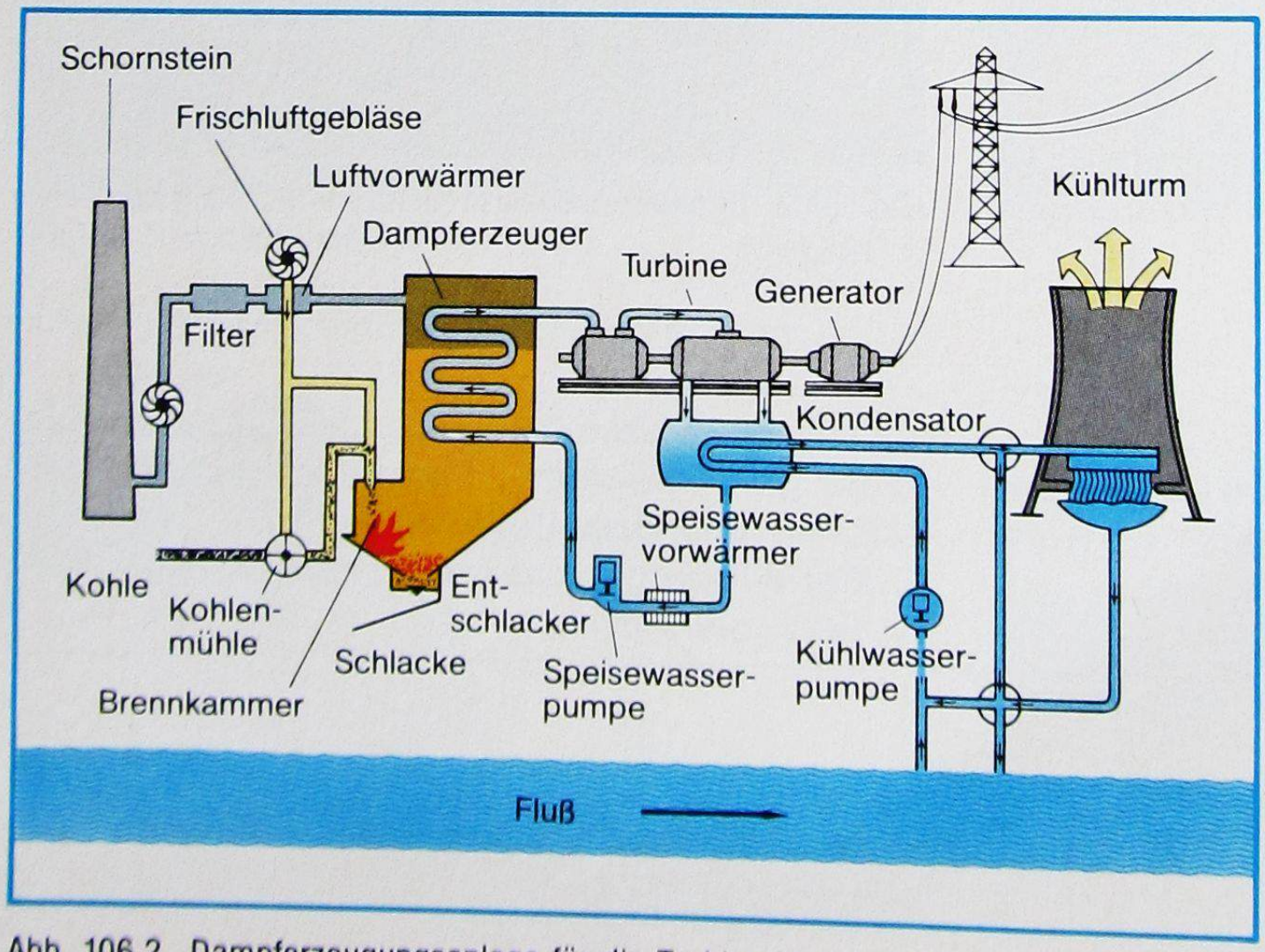


Abb. 106.2. Dampferzeugungsanlage für die Turbine in einem Kohlekraftwerk

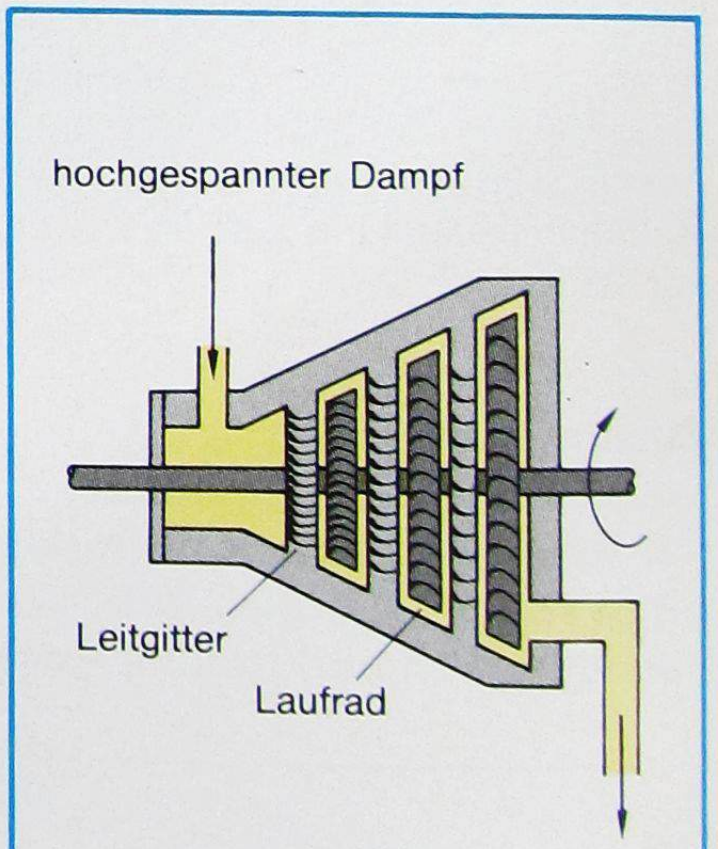


Abb. 106.3. Bauprinzip einer Dampfturbine

Gasturbinenkraftwerke haben einen relativ *niedrigen Wirkungsgrad* (nur 30 % bis 35 %) und werden deshalb nur in kleinen Einheiten gebaut. Da man aber schnell ihre Leistungsabgabe ändern kann, dienen sie dazu, die Spitzen des Bedarfs an elektrischer Energie zu decken, d. h. zur *Spitzenlastversorgung*.

In Gasturbinenkraftwerken wird die innere Energie der 500 °C heißen Abgase ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Das brachte die Ingenieure auf die Idee, mit den Abgasen noch Wasserdampf zu erzeugen, d. h., ein Dampfkraftwerk anzubauen. So lässt sich eine viel größere Abkühlung der Verbrennungsgase nutzen; der gesamte Wirkungsgrad steigt bis über 50 %. Die Kombination der beiden Kraftwerke nennt man **Gas- und Dampfkraftwerk**, abgekürzt **GuD-Kraftwerk.** *Abb. 107.1.* zeigt den prinzipiellen Aufbau eines GuD-Kraftwerks.

Eines der größten GuD-Kraftwerke arbeitet seit dem Jahr 1987 in Ambarli in der Türkei. Es besteht aus drei Blöcken mit je zwei Gasturbinen und einer Dampfturbine. Jede Turbine gibt dabei etwa 150 MW elektrische Energie ab.

Damit man auch Kohle für die GuD-Kraftwerke verwenden kann, besann man sich auf ein altes Verfahren, auf die **Kohlevergasung**, mit dem man früher Stadtgas und Koks aus Kohle erzeugt hat. Mit modernen Techniken erreicht man, dass das Gas etwa 85 % der chemischen Energie der Stein- und Braunkohle mit sich führt.

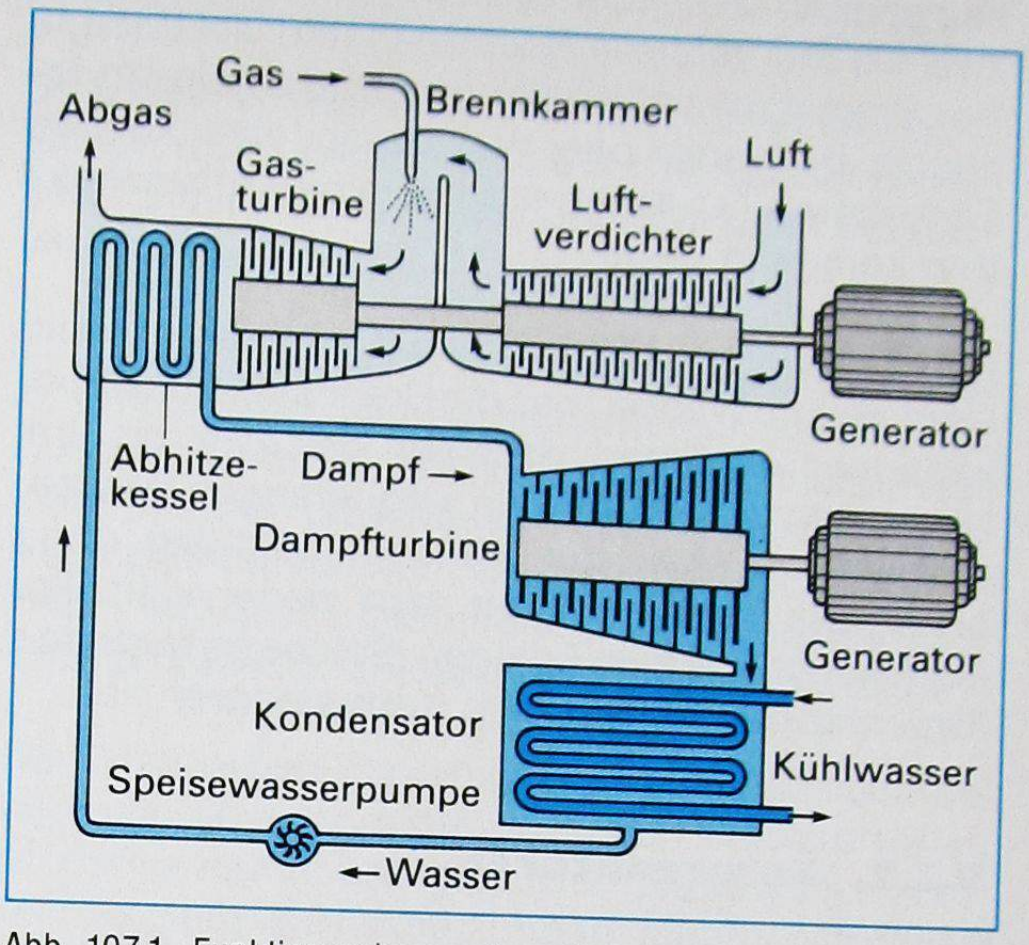


Abb. 107.1. Funktionsschema eines GuD-Kraftwerks

Zusammenfassung

1. Dampfkraftwerke verwenden erhitzten Wasserdampf, Gasturbinenkraftwerke ein Verbrennungsgas-Luft-Gemisch zum Antrieb der Turbinen.

2. Gas- und Dampf-Kraftwerke (GuD) kombinieren die beiden Prozesse und erreichen einen höheren Wirkungsgrad.

Aufgaben

1. Welche verschiedenen Arten von Wärmekraftwerken gibt es? Nenne Vor- und Nachteile.
2. a) Erkläre den Aufbau eines Dampfkraftwerkes.
b) Welche Energieumwandlungen finden in einem Dampfkraftwerk statt?
3. Wie ist ein Turbinenkraftwerk aufgebaut?
4. Gib den Aufbau eines GuD-Kraftwerkes an.
5. a) Welche gesamte Leistungsabgabe hat das GuD-Kraftwerk Ambarli in der Türkei? (siehe oben)
b) Welchen Primärenergieverbrauch hat es in einem Tag, wenn es voll in Betrieb ist?

9.3. Kernkraftwerke

9.3.1. Kontrollierte und gesteuerte Kettenreaktionen

$[^{235}_{92}]$-Uran lässt sich leicht durch *langsame Neutronen* spalten. Bei jeder Spaltung (Fission) werden zwei bis drei *schnelle Neutronen* und viel Energie frei. Bremst man diese Neutronen in einem *Moderator* (z. B. Graphit oder Wasser) ab, dann können sie weitere $^{235}_{92}$U-Kerne spalten; eine **Kettenreaktion** kommt in Gang.

Durch geeignete Maßnahmen (Cadmiumstäbe im Uran, Bor im Wasser, das die Brennstäbe umspült) kann man erreichen, dass von den zwei bis drei Neutronen gerade so viele weggefangen werden, dass genau eines zur weiteren Spaltung übrig bleibt; die Kettenreaktion wird weder schneller noch kommt sie zum Erliegen. Solche *gesteuerten Kettenreaktionen* laufen in Kernreaktoren ab.

Abb. 108.1. Kraftwerk Isar 2 bei Landshut

9.3.2. Kernreaktoren

Es gibt sog. **Leistungsreaktoren**, die als Energiequelle z. B. in Kernkraftwerken, Schiffen oder Satelliten eingesetzt werden. Daneben werden Reaktoren z. B. für Lehr- und Forschungszwecke oder für die Herstellung künstlicher radioaktiver Isotope (vgl. *S. 86*) verwendet. Diese Kernreaktoren werden **Forschungsreaktoren** genannt.

Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke, in denen durch Leistungsreaktoren elektrische Energie erzeugt wird. An Stelle des Dampfkessels in mit fossilen Brennsstoffen befeuerten Kraftwerken (vgl. Kap. 9.2.) tritt das Dampferzeugungssystem mit einem Druckwasserreaktor, wie z. B. im Kernkraftwerk Isar 2 in Ohu bei Landshut *(Abb. 108.1.)*. Seine Funktionsweise ist in *Abb. 108.2.* schematisch dargestellt.

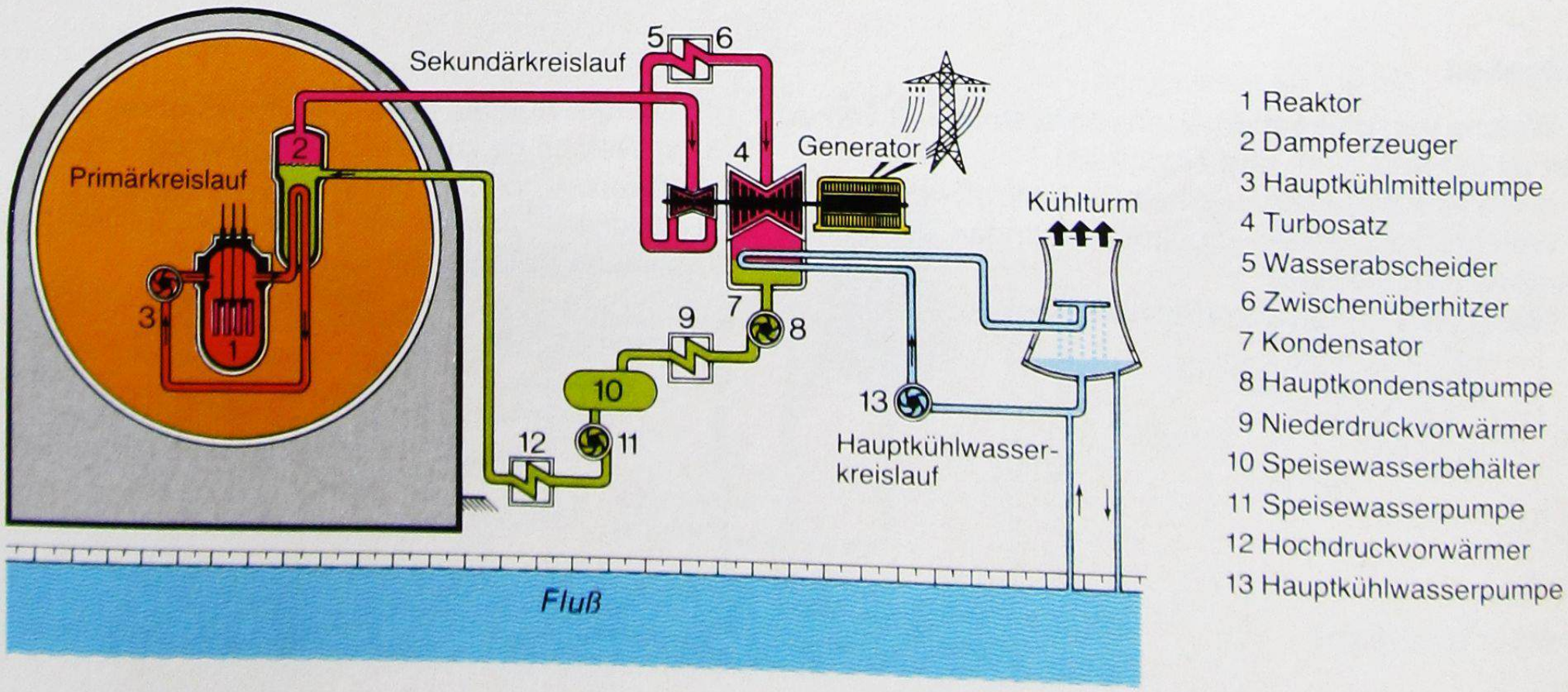


Abb. 108.2. Funktionsschema eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor

9.3.3. Auswirkungen eines Kernkraftwerkes auf die Umgebung

Beim Betrieb eines Kernkraftwerkes fallen radioaktive Stoffe in festem, flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand an. Diese werden zwar weitestgehend im Kraftwerk zurückgehalten, trotzdem lässt sich eine geringe Ableitung von radioaktiven Stoffen an die Umgebung nicht vermeiden. Sie wird im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die Errichtung und den Betrieb des Kernkraftwerks so festgelegt, dass eine Überschreitung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte ausgeschlossen bleibt. Damit soll eine Gefährdung der Umwelt vermieden werden.

In den Nasskühltürmen von Kernkraftwerken mit der heute üblichen Leistung von 1300 MW verdunsten zur Wärmeabfuhr des Kondensators ca. 800 Liter Wasser pro Sekunde. Nach der Kondensation des Wasserdampfs sind häufig weiße Nebelschwaden sichtbar. Die Beeinträchtigung der Umgebung ist dadurch nach den bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen unbedenklich.

Zusätzlich wird von diesen Kraftwerken erwärmtes Kühlwasser in Flüsse abgeleitet. Beim Kernkraftwerk Isar 2 wird dadurch z. B. die Isar bei mittlerer Wasserführung um ca. 0,2 °C aufgewärmt.

9.3.4. Sicherheit von Kernkraftwerken

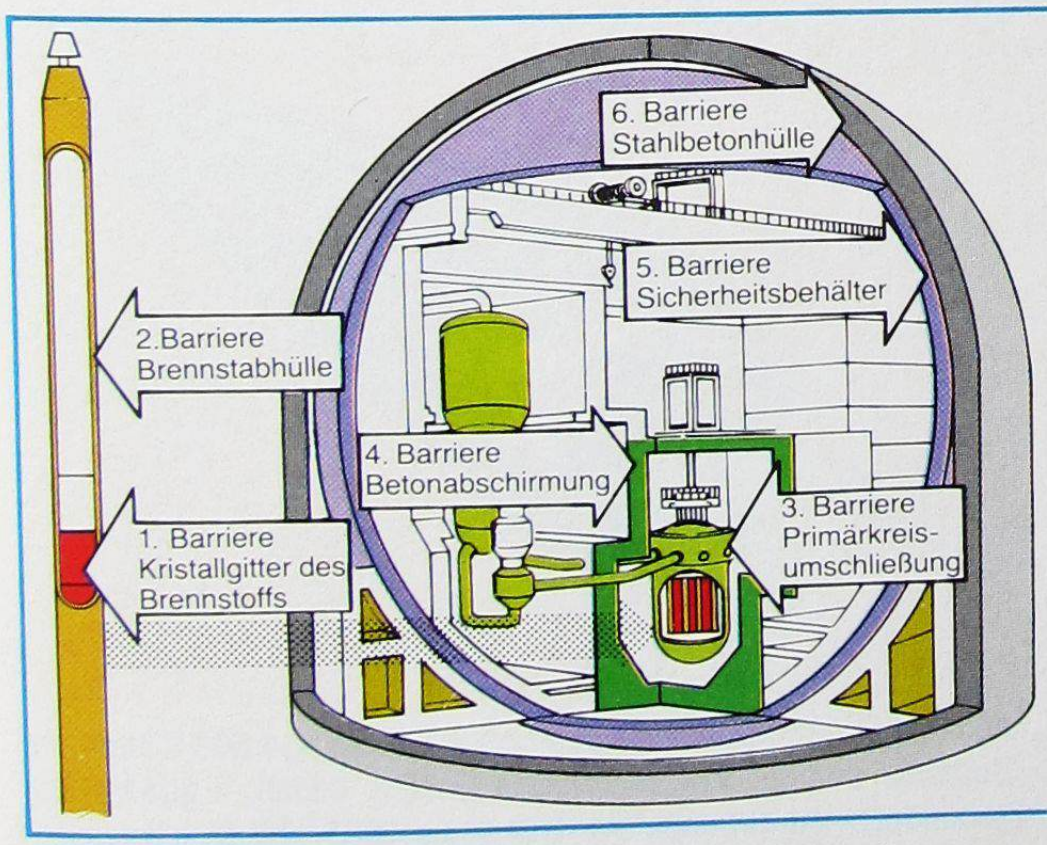
Trotz aller Vorsorge lassen sich Störungen beim Betrieb eines Kernkraftwerkes nicht völlig ausschließen. Daher wurde für die Errichtung und den Betrieb von Kernkraftwerken eine sehr aufwendige Sicherheitstechnik entwickelt, um die in der Umgebung lebenden Menschen sowie die in einem Kraftwerk Beschäftigten vor schädigenden Einflüssen durch radioaktive Strahlung zu schützen. So dient z. B. die Sicherheitsumschließung *(Abb. 109.1.)* dem Schutz der Umgebung vor den schädigenden Auswirkungen denkbarer, schwerer Störfälle.

Spezielle Vorkehrungen in der Kernkraftwerksanlage sollen zusätzlich die Sicherheit der Bevölkerung auch bei auftretenden Störfällen gewährleisten.

Ein Reaktorschutzsystem mit höchstmöglicher Zuverlässigkeit, aktive Sicherheitssysteme (z. B. Abschaltsysteme, Schnellschlussventile, Notkühlsysteme) und passive Komponenten (z. B. Reaktordruckbehälter, Sicherheitseinschließung, Filter) wirken als gestaffelte Barrieren gegen das Entweichen von radioaktiven Stoffen *(Abb. 110.1.)*.

Der Reaktorkern kann nicht wie eine Atombombe explodieren, auch nicht bei einem Versagen aller Sicherheitseinrichtungen, weil die physikalisch-technischen Voraussetzungen hierfür nicht gegeben sind.

Alle Kernreaktoren in Deutschland verwenden das Kühlwasser im Primärkreislauf als Moderator. Sollte durch eine Störung zu viel Wärme entstehen, dann verdampft das Wasser; die Kettenreaktion wird beendet. Verwendet man dagegen Graphit als Moderator, dann läuft die Kettenreaktion bei einer Störung weiter. Dies war ein Grund für die bisher größte Katastrophe, die durch ein Kernkraftwerk ausgelöst wurde:



1. Im Kristallgitter der Urantabletten werden die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte bis auf wenige Prozent festgehalten.
2. Hüllrohre aus Zirkaloy, gasdicht und druckfest verschweißt, umhüllen den Brennstoff und halten die Spaltprodukte fest.
3. Der Reaktordruckbehälter, aus Schmiedestücken zusammengefügt, ein Schutzpanzer, der den auftretenden Belastungen durch Druck, Temperatur und Strahlung standhält.
4. Der biologische Schild: 2–3 m dicker Stahlbeton. Als strahlenfester Schild umgibt er den Reaktordruckbehälter
5. Der Sicherheitsbehälter aus Stahl umgibt den nuklearen Teil der Anlage. Vollkommen dicht, und nur durch Schleusen begehbar.
6. Das Reaktorgebäude aus Stahlbeton umgibt den Sicherheitsbehälter und dient vor allem gegen Einwirkungen von außen.

Brennstoff
Hüllrohre
Primärkreisumschließung
Betonabschirmung
Sicherheitsbehälter
Stahlbetonhülle

Abb. 109.1. Sicherheitsbarrieren in einem Kernkraftwerk

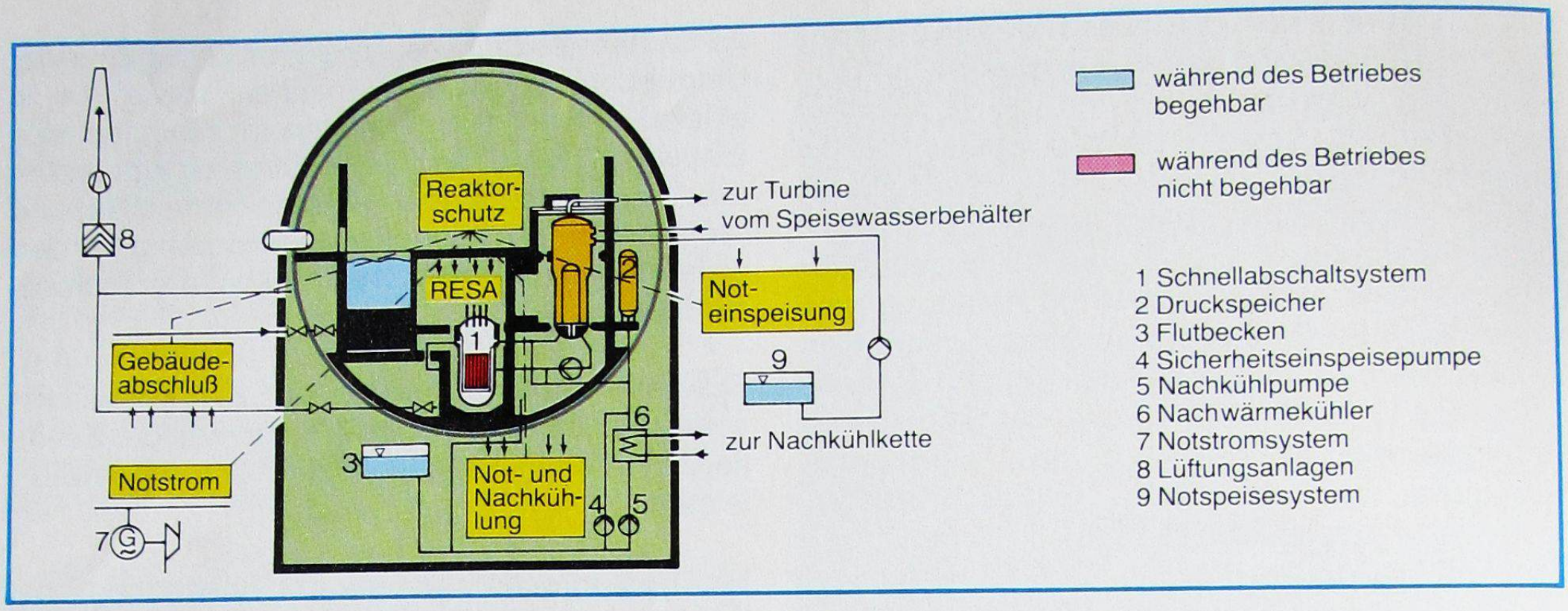


Abb. 110.1. Sicherheitstechnische Einrichtungen in einem Kernkraftwerk

Im Jahr 1987 schaltete das Bedienungspersonal in **Tschernobyl** in Russland zuerst alle automatischen Sicherheitssysteme für einen Versuch aus. Dann führte eine Fehlbedienung zu einer Überhitzung; die Kettenreaktion lief ungehindert weiter und ließ in kürzester Zeit den Reaktorkern schmelzen. Chemische Explosionen begleiteten den Vorgang; große Mengen radioaktiver Stoffe wurden freigesetzt und verseuchten eine ganze Landschaft. Ein kleiner Teil der radioaktiven Stoffe wurde durch Luftströmungen bis nach Mitteleuropa getragen.

9.3.5. Brennelementlagerung und Entsorgung

Von den 193 Brennelementen des Reaktorkerns im Kernkraftwerk Ohu *(Abb. 108.1.)* werden pro Jahr ca. ein Drittel der abgebrannten Brennelemente durch neue Brennelemente ersetzt. Die ausgedienten Brennelemente werden zunächst im Brennelementlagerbecken im Reaktorgebäude *(Abb. 110.2.)* gelagert, um Strahlung und Nachzerfallswärme abklingen zu lassen.

Nach einer Abklingzeit von mindestens 180 Tagen können die Brennelemente in abgeschirmten Transportbehältern in ein zentrales Brennelementlager überführt und dort bis zur Wiederaufbereitung oder Endlagerung zwischengelagert werden *(Abb. 111.1.)*.

Die nukleare Entsorgung wird weltweit geplant und durchgeführt; dabei sind aus Sicherheitsgründen noch viele Probleme zu lösen.

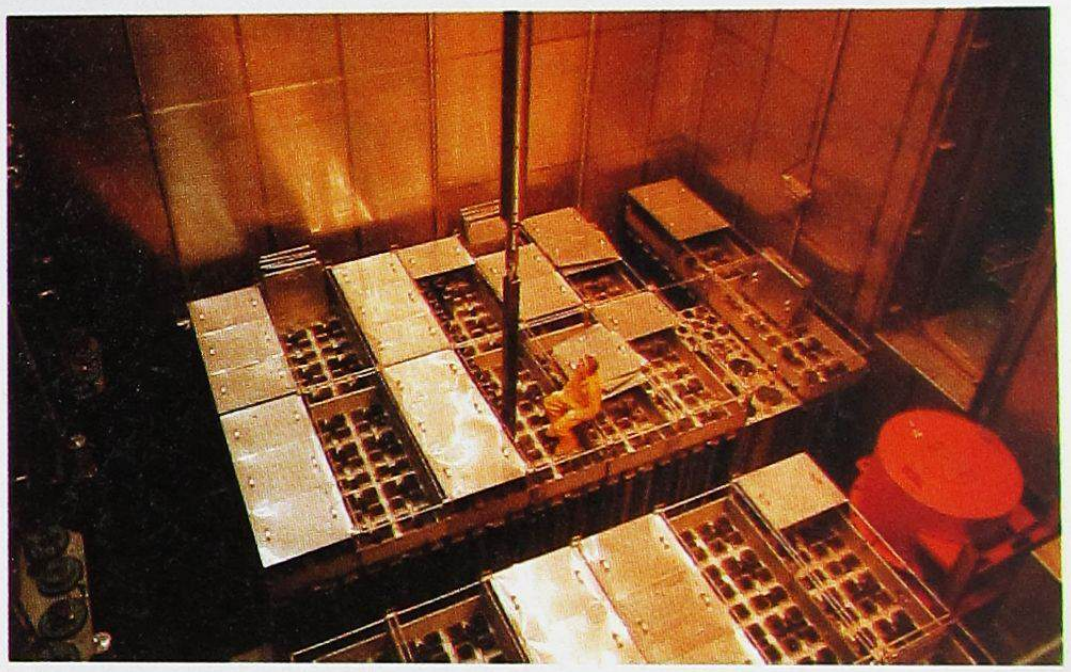


Abb. 110.2. Die Brennelementlagerung im Kernkraftwerk ist die erste Entsorgungsstation; hier ein Brennelement-Kompaktlager. Es befindet sich im Reaktorgebäude in unmittelbarer Nähe des Reaktordruckgefäßes, wird später mit Wasser geflutet und kann abgebrannte Brennelemente aus neun- bis zehnjährigem Reaktorbetrieb aufnehmen.

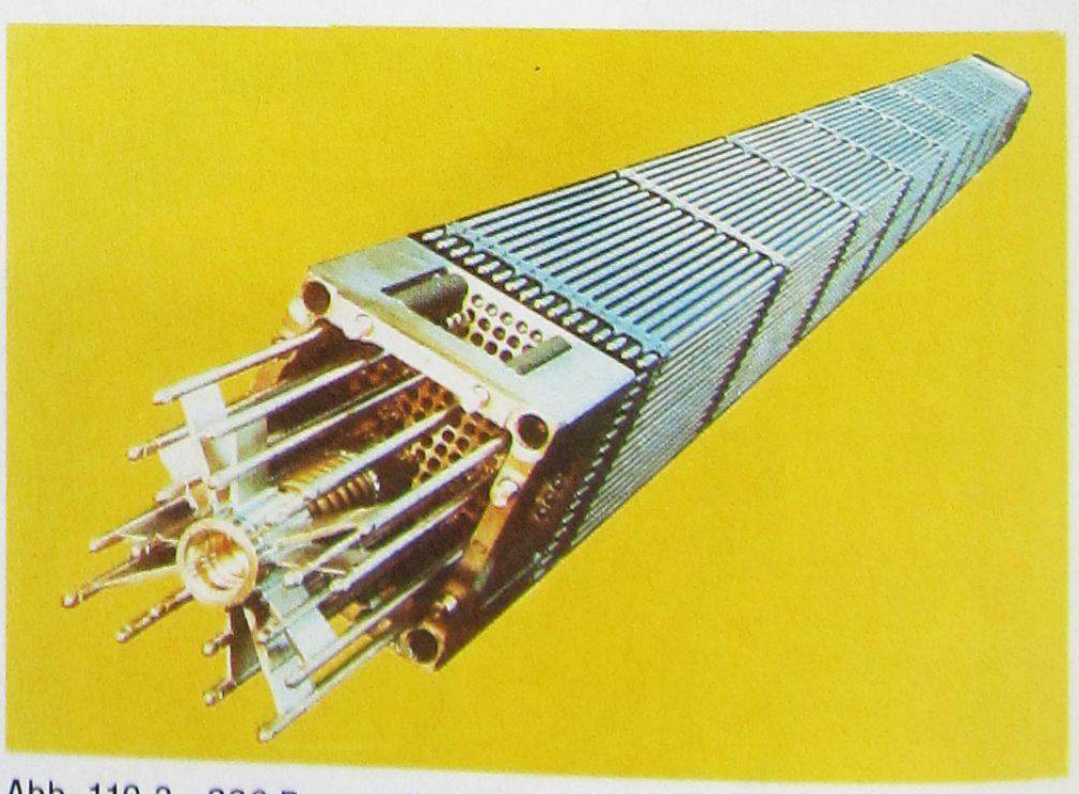


Abb. 110.3. 236 Brennstäbe mit einer Füllung von 608 Kilogramm Uranoxid und 20 Regelstabführungsrohre bilden – quadratisch gebündelt – ein Brennelement für einen 1300-MW-Druckwasserreaktor.

Abb. 111.1. Versuchseinlagerung radioaktiver Abfälle im stillgelegten Salzbergwerk Asse II.

9.3.6. Weitere Reaktortypen

Das *spaltbare* [$^{235}_{92}$U]-Uran ist nur zu einem Massenanteil von 0,7 % in dem in der Natur vorkommenden Uran enthalten. Das restliche Uran kann jedoch durch Neutronen zu *spaltbarem* [$^{239}_{94}$Pu]-Plutonium umgewandelt werden.
Kernreaktoren, die so aufgebaut sind, dass sie in erster Linie Plutonium „erbrüten", nennt man **Brutreaktoren**.

In Deutschland wurde die Entwicklung von Brutreaktoren abgebrochen. Die an fossilen Energieträgern ärmeren Länder wie z. B. Frankreich und Japan verfolgen weiter diese Möglichkeit, um das Uran erheblich besser energetisch nutzen zu können.

Kernkraftwerke haben einen relativ geringen Wirkungsgrad von 30 % bis 35 %, da sie den Wasserdampf nur bis etwa 300 °C erwärmen. Durch einen anderen Aufbau kann man erreichen, dass die Wärme im Reaktor durch etwa 1000 °C heißes Helium abgeführt wird. Diese **Hochtemperaturreaktoren** sind technisch noch nicht ausgereift; der einzige Versuchsreaktor in Deutschland wurde abgeschaltet.

9.3.7. Fusionsreaktoren

In *Fusionsreaktoren* soll die Energie, die Atomkerne enthalten können, auf einem ganz anderen Weg genutzt werden: durch die Verschmelzung **(Fusion)** von Wasserstoff zu Helium. Im Prinzip ist dies der gleiche Vorgang, der die ungeheuer große Energie in der Sonne freisetzt. Man möchte also das „Feuer der Sonne" gezähmt auf die Erde holen. Bis jetzt war die Kernverschmelzung nur „ungezähmt" in Wasserstoffbomben möglich. Trotz sehr großem, langjährigem Forschungsaufwand auf der ganzen Welt ist es bisher nur gelungen, die Fusion für wenige Sekunden im Labor ablaufen zu lassen. Zur Zeit ist nicht abzusehen, ob und wann den Menschen diese nahezu unerschöpfliche Energie zur Verfügung stehen wird.

Zusammenfassung

1. Kernkraftwerke setzen die Energie um, die bei der Spaltung (Fission) von Uran frei wird.

2. Ob und wann die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium (Fusion) genutzt werden kann, ist noch nicht abzusehen.

Aufgaben

1. Welche Kernreaktionen nutzt man bzw. versucht man für Energieumsetzungen zu nutzen?
2. Was ist eine Kettenreaktion?
3. Erkläre den Aufbau eines Kernreaktors.
4. a) Was ist ein Brutreaktor?
b) Was ist ein Hochtemperaturreaktor?
5. Wie weit ist die Entwicklung, die Kernfusion technisch zu nutzen?

10. Solarenergie

10.1. Grundlagen der Solarenergie

Man nimmt heute allgemein an, dass das Weltall vor etwa 15 Milliarden Jahren durch den *Urknall*, durch eine ungeheuere Explosion, entstanden ist. Ein Teil der riesigen Wasserstoffwolken, die der Urknall hervorgebracht hatte, zog sich schon bald durch die *Gravitation (Massenanziehungskräfte)* zu den ersten Sternen zusammen, in denen dann durch den gewaltigen Druck und die riesigen Temperaturen die *Fusion von Wasserstoff zu Helium* einsetzte; die Sterne begannen, Energie abzustrahlen.

Ist der ganze Wasserstoffvorrat verbraucht, dann kann der Stern, wenn er genügend Masse hat, in einer ungeheueren Explosion, zu einer *Supernova* zerbersten. Dabei werden auch schwere Elemente wie z. B. Blei und Uran erzeugt und freigesetzt.

Durch Aufzeichnungen vor allem aus China und Japan wissen wir, dass um das Jahr 1054 eine solche Supernova den Sternenhimmel überstrahlt hat; sie war so hell, dass man sie fast einen Monat lang auch tagsüber beobachten konnte. Die Reste der Explosion sind heute als *Krebsnebel* beobachtbar *(Abb. 112.1.)*.

Man nimmt nun weiter an, dass in der Nähe der Stelle des Weltalls, an der sich jetzt unser Sonnensystem befindet, eine oder mehrere solcher Supernovaexplosionen stattgefunden und schwere Elemente freigesetzt haben. Sie brachten auch die Wasserstoffwolken in ihrer Umgebung etwas aus dem Gleichgewicht, so dass diese sich vor etwa fünf Milliarden Jahren zur Sonne und den Planeten zusammenzogen.

Unsere Sonne ist also ein Stern der „zweiten Generation". Alle schweren Elemente im Sonnensystem, auch die, die wir auf unserer Erde oder in unserem Körper vorfinden, sind im Zusammenhang mit der Explosion dieser vorhergehenden Sterne entstanden. Derartige „Geburten neuer Sterne" lassen sich jetzt noch beobachten *(Abb. 112.2.)*.

Mit dieser einfachen Vorstellung können wir den Ursprung aller Energie erklären, die wir auf der Erde umsetzen: Die *Fusionsenergie* (Fusion von Wasserstoff zu Helium im Labor oder in der Wasserstoffbombe) stammt von den Anfängen des Weltalls, die *Kernenergie* aus der *Fission* (Spaltung von Urankernen in Kernkraftwerken oder im Erdinneren – Erdwärme) aus der Supernovaexplosion vor der Bildung unserer Sonne.

Die Zusammenballung der Wasserstoffwolken zum Sonnensystem hatte die Bewegung der Planeten und der Monde zur Folge (Gezeitenkraftwerke).

Abb. 112.1. Krebsnebel, Überrest der Supernova 1054

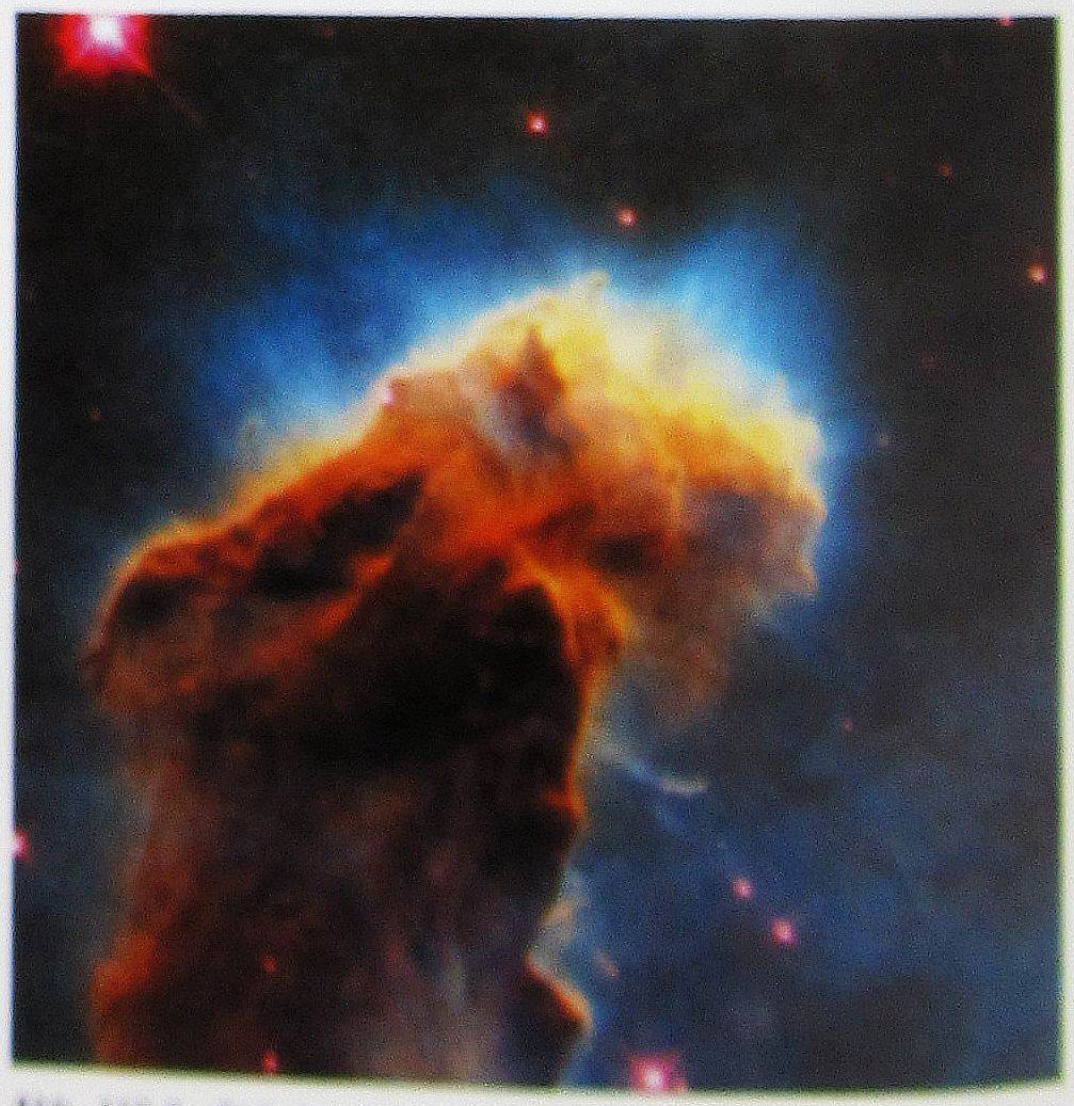


Abb. 112.2. Teil des Adlernebels, in dem neue Sterne entstanden sind

Den weitaus größten Anteil des Energieumsatzes auf der Erde verursacht die Sonne durch ihre *Strahlung*; er stammt damit mittelbar von den Anfängen des Weltalls.
Dies gilt auch für die Verbrennung fossiler Energieträger; in ihnen ist ein geringer Teil der Sonnenstrahlung gespeichert, die die Erde vor Millionen Jahren getroffen hat.

Durch einen Versuch kann man die Strahlungsenergie der Sonne abschätzen.

Versuch

Wir schwärzen den Boden eines Erlenmeyerkolbens, damit er die einfallende Sonnenstrahlung möglichst vollständig absorbiert. Dann füllen wir ihn mit Wasser, verschließen ihn mit einem durchbohrten Korken und stecken durch das Loch ein Thermometer. Wir richten schließlich den Kolben so aus, dass er senkrecht von der Sonnenstrahlung beschienen wird und messen die Temperatur des Wassers in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer *(Abb. 113.1.)*.
Beobachtung. Die Temperatur des Wassers im Erlenmeyerkolben steigt langsam an.
Auswertung. Mit Hilfe der Beziehung $Q = c_w \cdot m \cdot \vartheta$ können wir die Energie abschätzen, die die Sonnenstrahlung dem Wasser übermittelt hat. Dividiert man durch die Beobachtungszeit t, dann erhält man die Leistung:

$P_{\text{Strahlung}} = \frac{Q}{t}$; dividiert man noch durch die Fläche A der bestrahlten Fläche, dann erhält man die Leistungsdichte: $S = \frac{P}{A}$. Sie wird **Solarkonstante** genannt.

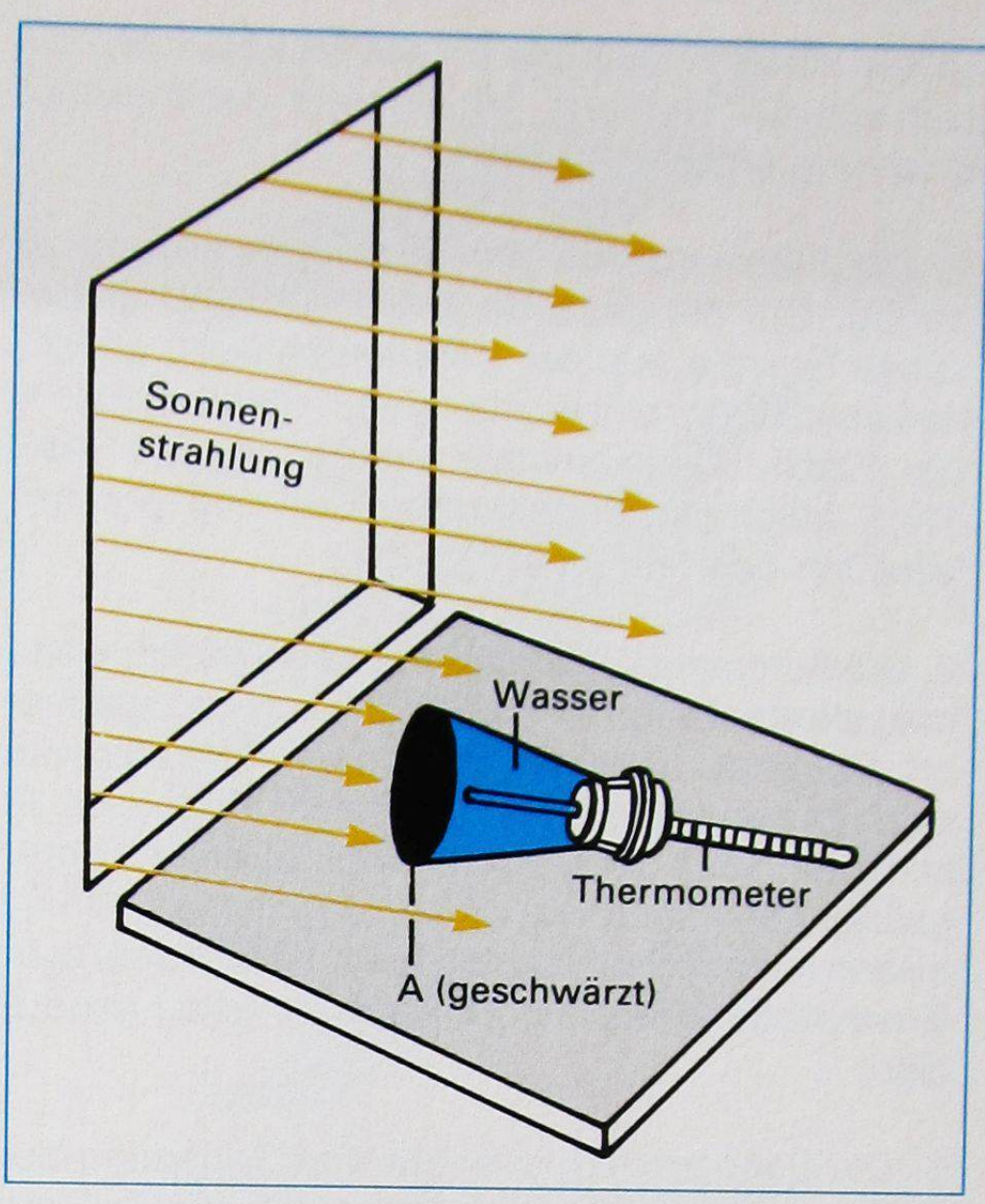


Abb. 113.1. Versuch zur Abschätzung der Solarkonstanten

Die Solarkonstante hat oberhalb der Erdatmosphäre einen Wert von 1360 $\frac{W}{m^2}$; davon kommen auf der Erdoberfläche unter optimalen Bedingungen etwa 1000 $\frac{W}{m^2}$ an. Bei trübem Wetter verringert sich die Leistung entsprechend *(Abb. 113.2.)*. Ist die bestrahlte Fläche waagrecht ausgerichtet, dann wird die Leistung nochmals kleiner, weil die Strahlung nicht senkrecht einfällt; dieser Effekt ist im Winter stärker als im Sommer.

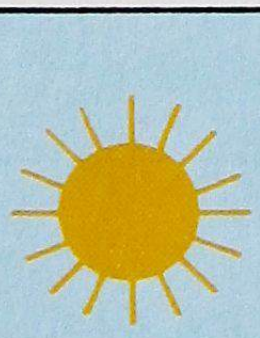
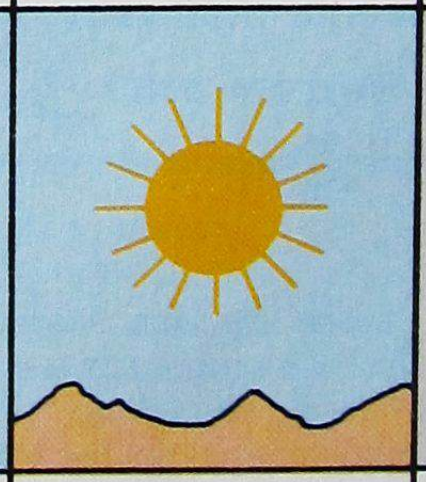
Wetter	klarer blauer Himmel	Sonne bricht durch	Sonne als weiße Scheibe	trüber Wintertag
				
Gesamtstrahlung	1000 W/m²	600 W/m²	300 W/m²	100 W/m²

Abb. 113.2. Wetterverhältnisse und Gesamtstrahlungsleistung

Unser Versuch lässt die Probleme erkennen, die sich bei der Nutzung der Energie der Sonnenstrahlung ergeben können:

1. Die Flächendichte der Strahlungsleistung ist gering. Um die gesamte in Deutschland umgesetzte Energie aus der Sonnenstrahlung gewinnen zu können, würde man dafür etwa bis zu 2 % der Fläche Deutschlands benötigen. Die *Abb. 114.1.* zeigt die eingestrahlte Leistung pro m^2, gemittelt über ein Jahr.

2. Die Sonnenenergie ist dann am größten, wenn man sie am wenigsten benötigt, nämlich tagsüber im Sommer. Riesige Pumpspeicherkraftwerke sind notwendig, um den Tag-Nacht-Ausgleich zu schaffen, und die Speicherung Sommer-Winter gelingt nach den derzeitigen technischen Kenntnissen nur auf chemischem Weg, z. B., indem man Brennstoffe (Wasserstoff, Methan, usw.) produziert.

3. Die Sonnenenergie fällt in den Gegenden der Erde am meisten an, in denen sie zur Zeit am wenigsten gebraucht wird. Z. B. könnte man in der Sahara etwa 2,5-mal so viel Energie gewinnen wie im dichtbesiedelten Mitteleuropa. Um dies auszugleichen, wären riesige Transportsysteme notwendig, vergleichbar mit den Tankerflotten, die das Erdöl aus Arabien nach Mitteleuropa oder Japan bringen.

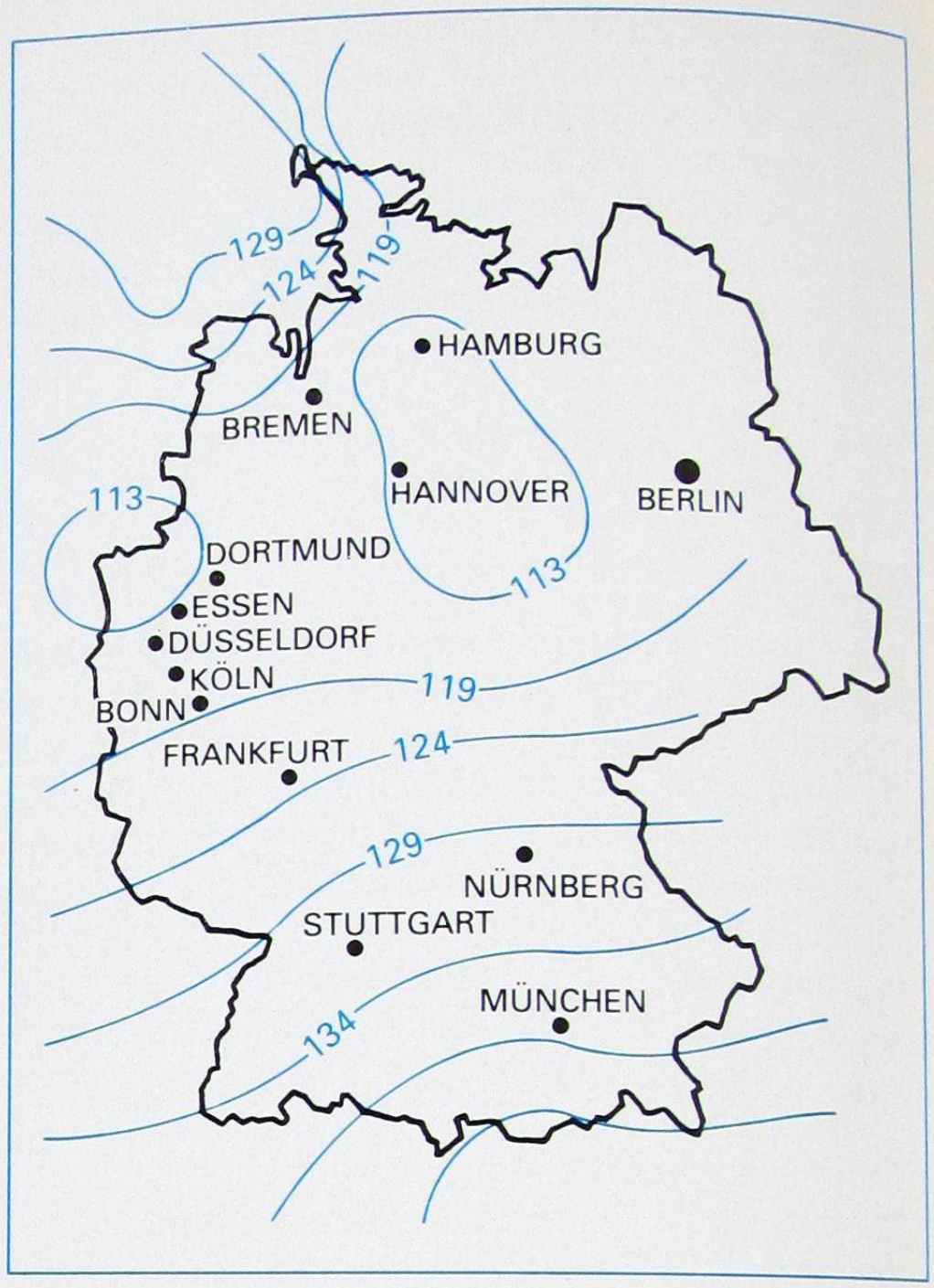


Abb. 114.1. Durchschnittswerte der jährlichen Gesamtstrahlungsleistung in Deutschland auf eine horizontale Fläche $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

Trotz dieser Probleme verspricht man sich langfristig von der Strahlungsenergie der Sonne einen entscheidenden Beitrag zur Energieversorgung auf der Erde. Dazu muss aber noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsaufwand geleistet werden.

Zusammenfassung

1. Die Strahlungsenergie der Sonne hat ihre Ursache in der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium im Inneren der Sonne.
2. Die Solarkonstante hat außerhalb der Atmosphäre den Wert $S = 1360 \frac{W}{m^2}$.
3. Bei der Nutzung der Sonnenenergie gibt es bezüglich der Leistungsdichte und der Verfügbarkeit zur Zeit noch Probleme.

Aufgaben

1. Welche Ursachen haben die verschiedenen Arten der Energie, die auf der Erde umgesetzt werden?
2. Woher stammt die Energie der Sonne?
3. Welche Probleme ergeben sich bei der Nutzung der Strahlungsenergie der Sonne?
4. Vergleiche *Abb. 114.1.* Schätze ab, wieviel Energie in einem Jahr auf 1 m^2 Fläche eingestrahlt wird. Nimm dazu den Wert 135 $\frac{W}{m^2}$ und berücksichtige, dass die Mittelung über die gesamte Zeit eines Jahres, also auch über Tag und Nacht, erfolgt ist.

10.2. Solartechniken

10.2.1. Sonnenkollektoren

Der Versuch mit dem Erlenmeyerkolben *(S. 113)* legt nahe, mit absorbierter Sonnenstrahlung Wasser zu erwärmen. Man spricht dann von **thermischer Nutzung** der Sonnenenergie.

Die *Abb. 115.1.* zeigt verschiedene Bauarten von Sonnenkollektoren. Kernstück jedes Sonnenkollektors ist der *Absorber*, ein von Röhren durchzogenes schwarzes Blech. Wie der Boden des Erlenmeyerkolbens absorbiert er die Sonnenstrahlung und wandelt sie in Wärme um (photothermische Wandlung).

Damit der Absorber möglichst wenig Wärme an die Umgebung abgibt, baut man ihn in einen *Kollektor*; das ist ein Kasten mit guter Wärmedämmung und Glasabdeckung. Der Kollektor wirkt wie ein Treibhaus, das die Sonnenstrahlung hineinlässt, die Wärme aber gefangen hält. Zur besseren Wärmedämmung kann man die Absorberrohre noch in Vakuum einschließen.

Mit Sonnenkollektoren erzielt man im Sommer Wirkungsgrade von über 50 %, im Winter allerdings nur von 20 %, wegen der größeren Temperaturdifferenz zwischen der Flüssigkeit im Absorber und der Umgebung. Damit lässt sich der Warmwasserbedarf eines Hauses im Sommer vollständig und in der restlichen Zeit des Jahres teilweise decken. Man kann also die Heizung im Sommer ganz abschalten und über das Jahr etwa 60 % der Heizenergie für Warmwasser sparen.

Die *Abb. 115.2.* zeigt den Aufbau einer solchen kombinierten Warmwasserheizung. Für einen Warmwasserverbrauch von 45 Liter im Tag rechnet man mit 1 m^2 Absorberfläche.

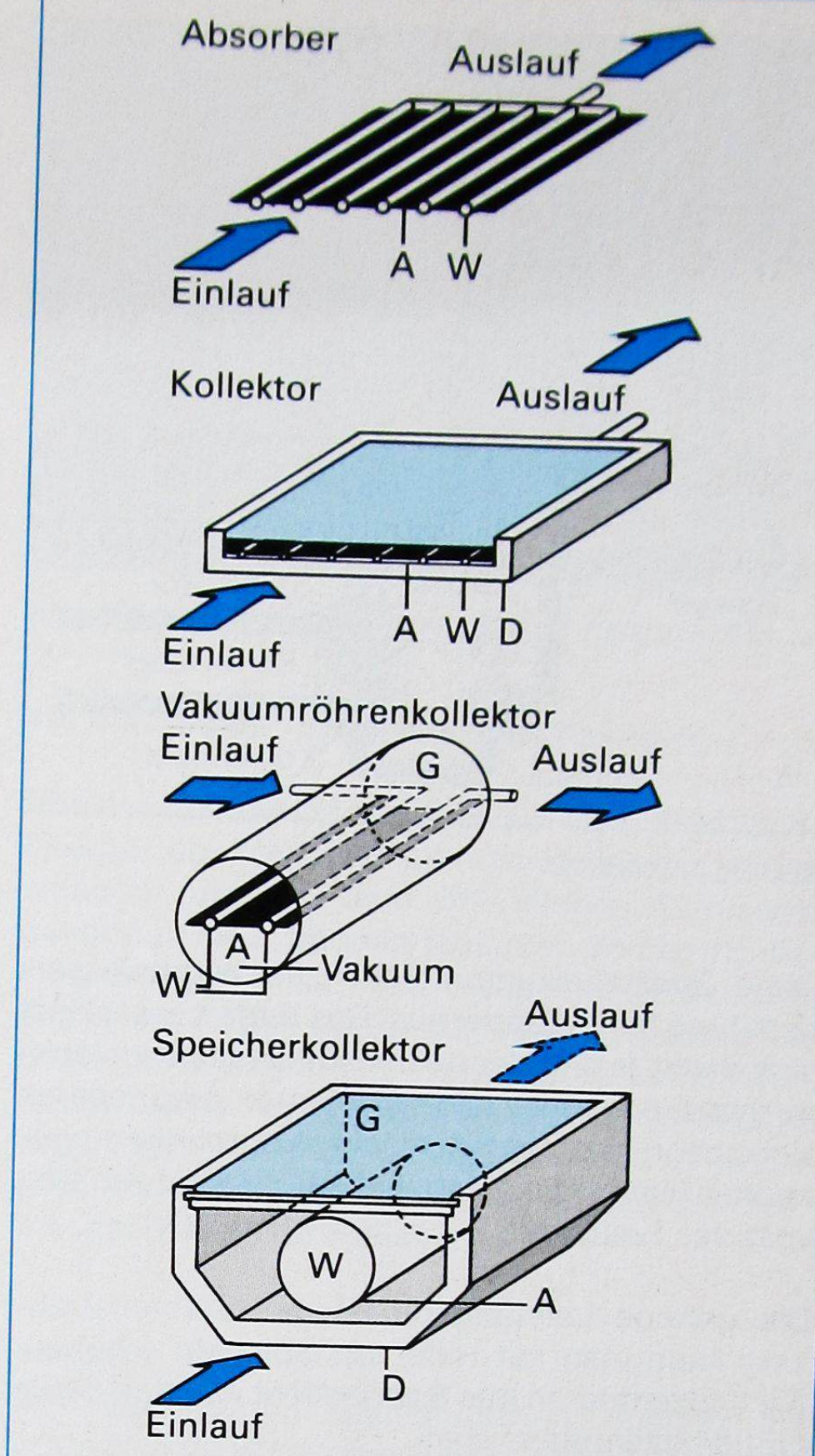


Abb. 115.1. Verschiedene Bauarten von Sonnenkollektoren

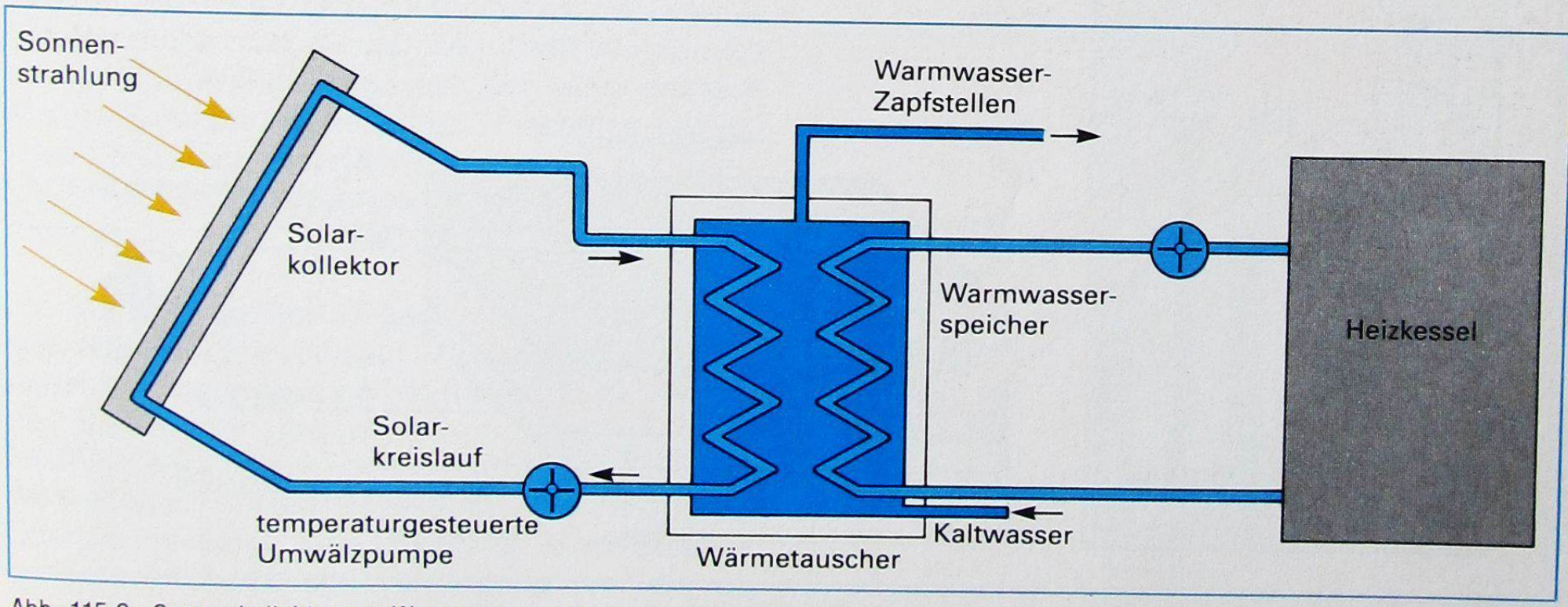


Abb. 115.2. Sonnenkollektor zur Warmwasserversorgung

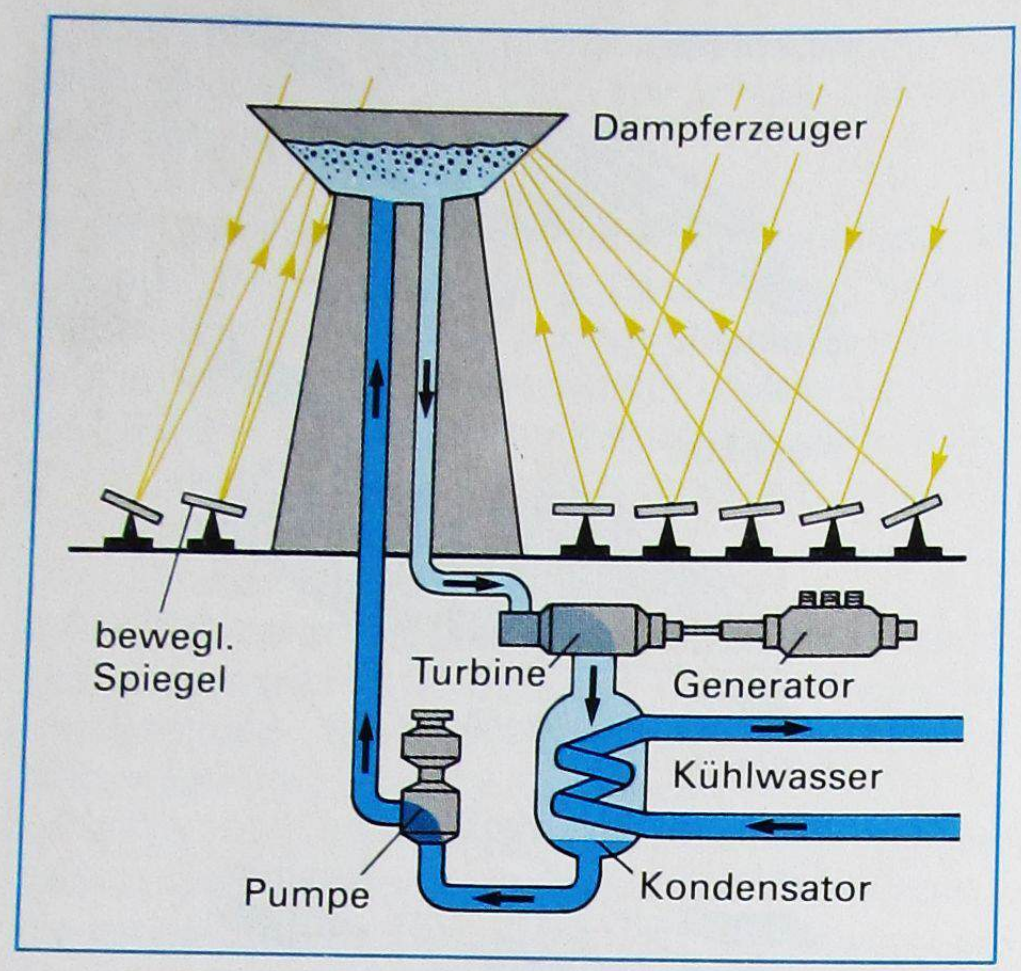


Abb. 116.1. Solarturm

Ohne Zusatzheizung kommt die Warmwasserbereitung für Freibäder aus. Das Badewasser lässt sich damit fast in der gesamten Badesaison ausreichend erwärmen. Diese Anlagen amortisieren sich schon nach wenigen Jahren durch die eingesparten Heizungskosten und erhöhen die Attraktivität des Freibades.

Die geringe Leistungsdichte der Sonnenstrahlung kann man mit Hilfe von Spiegeln erhöhen. Sie konzentrieren das Sonnenlicht auf eine Stelle und erhitzen diese stark.

Mit den sogenannten **Sonnenöfen** *(vgl. Abb. 98.2.)* kann man tagsüber kochen oder backen und damit Brennmaterial sparen. Werden die Sonnenstrahlen an die Spitze eines Turmes gelenkt, dann kann ein Dampferzeuger die Energie aufnehmen und eine Turbine mit angeschlossenem Generator elektrische Energie erzeugen. Diese **Solarturmanlagen** *(Abb. 116.1.)* benötigen große Flächen für das Aufstellen der Spiegel, die einzeln dem jeweiligen Stand der Sonne nachgeführt werden müssen. Solarturmanlagen arbeiten auch in sonnenscheinreichen Gebieten, z. B. in Wüsten, noch nicht wirtschaftlich.

10.2.2. Solarzellen

Solarzellen können die Energie der Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie umwandeln. Sie bestehen aus dünnen Siliciumplättchen mit zwei unterschiedlichen Schichten *(Abb. 116.2.)*. Fällt Licht auf eine Solarzelle, dann werden in der Grenzschicht Ladungsträger freigeschüttelt. Metallkontakte auf beiden Seiten des Siliciumplättchens führen die Ladungsträger ab. An den Anschlüssen liegt je nach Beleuchtungsstärke eine Spannung bis zu etwa 0,5 V an; die Stromstärke ist abhängig von der beleuchteten Fläche des Siliciumplättchens.

Versuch

Wir messen die Spannungs-Strom-Kennlinie einer handelsüblichen Silicium-Solarzelle. Dazu schließen wir einen Strommesser und einen regelbaren Widerstand in Reihe an die Solarzelle.

Abb. 116.2. Aufbau einer Solarzelle

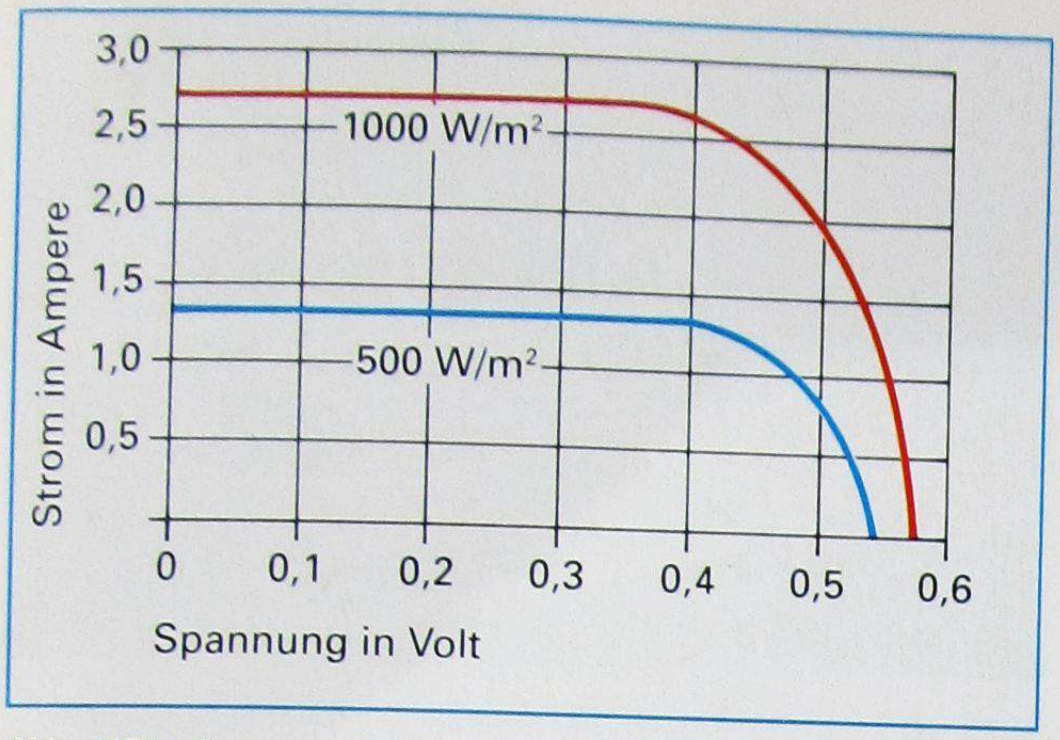


Abb. 117.1. Spannungs-Strom-Kennlinie einer Silicium-Solarzelle

Parallel dazu schalten wir ein Spannungsmessgerät. Dann bestrahlen wir die Solarzelle entweder durch die Sonne oder mit einer Glühlampe, verändern den Widerstand und messen Strom und Spannung. Wir wiederholen den Versuch für andere Beleuchtungsstärken.
Ergebnis. Abb. 117.1. zeigt eine mögliche Messung. Man erkennt, dass die Stromstärke für weite Bereiche der Spannung, d. h. für einen großen Widerstandsbereich, nahezu konstant bleibt, aber stark von der Beleuchtungsstärke abhängt. Die Spannung im unbelasteten Bereich der Zelle (für Stromstärke 0) hängt dagegen nur schwach von der Beleuchtungsstärke ab.

Solarzellen haben, je nach Bauart, nur einen Wirkungsgrad von höchstens 20 %. Um größere Leistungen zu erreichen, werden sie zu *Modulen* zusammengeschaltet. Die Vorteile solcher **Photovoltaik-Anlagen** sind Umweltfreundlichkeit beim Betrieb, Wartungsarmut und Verschleißfreiheit. Sie erzeugen hochwertige elektrische Energie im Bereich von µW bis GW, je nach Größe der Anlage. Die Nachteile sind die zur Zeit noch teuere und aufwendige Herstellung, bei der eine größere Menge Schadstoffe frei wird; Solarzellen produzieren erst nach mehrjährigem Einsatz die Energie, die zur ihrer Herstellung aufgewendet werden musste.

Ein weiterer Nachteil ist der große Flächenbedarf von Photovoltaik-Anlagen. Auch bei voller Sonnenstrahlung geben sie höchstens 10 W pro m^2 ab. Sie können jedoch schon jetzt im Kleinleistungsbereich oder dort wirtschaftlich arbeiten, wo weitab vom öffentlichen Stromnetz elektrische Energie benötigt wird. Beispiele sind Solartaschenrechner und die Versorgung von einsam gelegenen Gebäuden *(Abb. 117.2.)*.

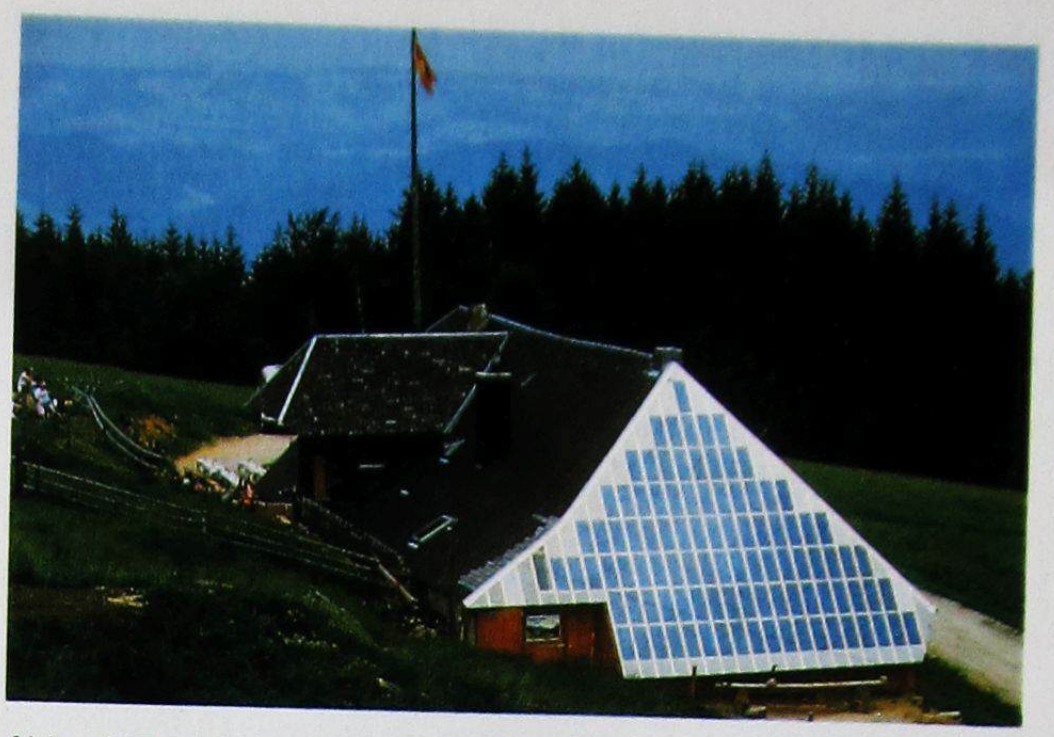


Abb. 117.2. Elektrische Versorgung eines Bergbauernhofs mit Solarenergie

10.2.3. Solar-Wasserstoff-Technik

Photovoltaik-Anlagen geben nur dann elektrische Energie ab, wenn es genügend hell ist. Kleinanlagen, die mit dem öffentlichen Stromnetz gekoppelt sind, können tagsüber die überschüssige Energie in das Netz einspeisen und nachts sowie an Tagen mit ungünstiger Witterung die benötigte Energie dem Netz wieder entnehmen. Soll jedoch die umweltschonende Sonnenenergie im großen Maße zur Energieversorgung eingesetzt werden, muss man Wege finden, die elektrische Energie zu speichern.

Versuch

Wir füllen einen hofmannschen Apparat mit Wasser, dem wir zur besseren Leitfähigkeit etwas Säure-Lösung zugesetzt haben. Dann legen wir eine Gleichspannung an die Elektroden an *(Abb. 117.3.)*.

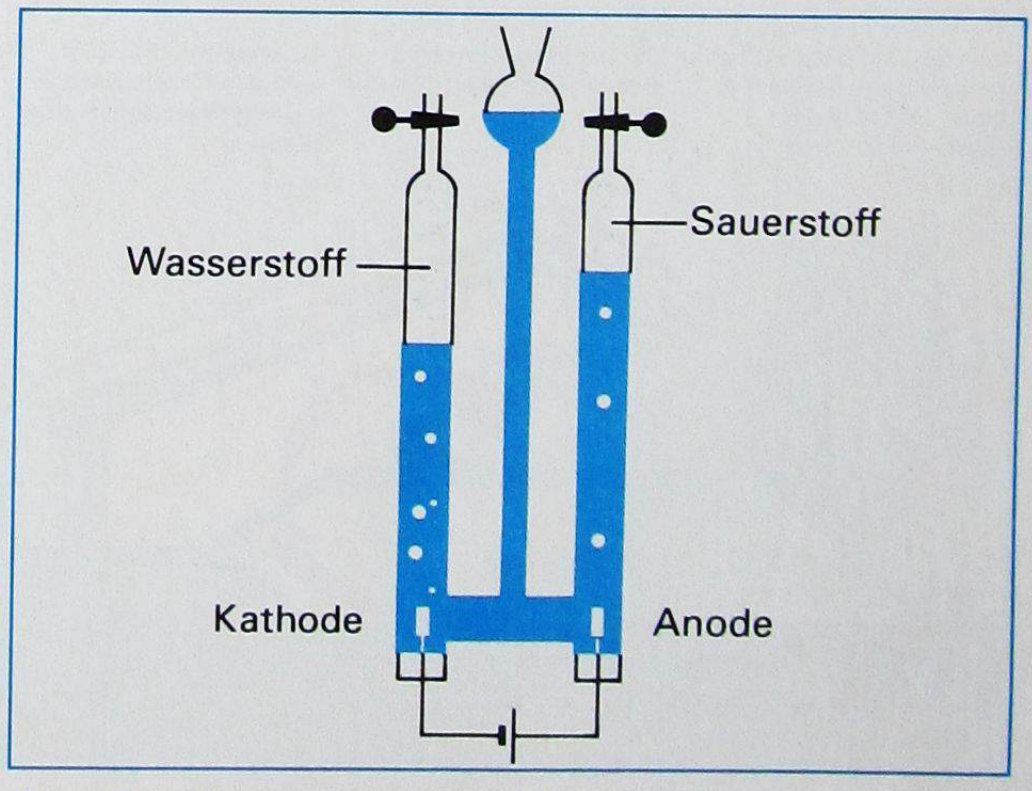


Abb. 117.3. Hofmannscher Apparat

Beobachtung. Schon bei etwa 5 V setzt in beiden Schenkeln des Apparates eine deutliche Gasentwicklung ein. An der *Anode* entsteht *Sauerstoff* (Nachweis durch das helle Aufleuchten eines glimmenden Holzspanes); an der *Kathode* wird *Wasserstoff* abgegeben, der mit bläulicher Flamme brennt (Knallgasprobe). Durch die elektrische Energie wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Die aufgewendete Energie wird beim Verbrennen des Wasserstoffs wieder frei.

Mit Hilfe des Wasserstoffes können wir die Energie speichern und transportieren, die wir aus den Sonnenstrahlen gewonnen haben. Gegenüber anderen brennbaren Gasen hat aber Wasserstoff zwei Nachteile: Zur Speicherung einer bestimmten Energieportion benötigt man bei gleichem Druck wesentlich mehr Volumen, z. B. gegenüber Erdgas das dreifache Volumen. Der zweite Nachteil ist, dass sich Wasserstoff vor allem bei hohem Druck schlecht speichern lässt; die kleinen Wasserstoff-Moleküle drängen sich zwischen die Atome bzw. Moleküle der Gefäßwand hindurch; der Wasserstoff entweicht teilweise. Einen Ausweg bietet die Verflüssigung des Wasserstoffes,

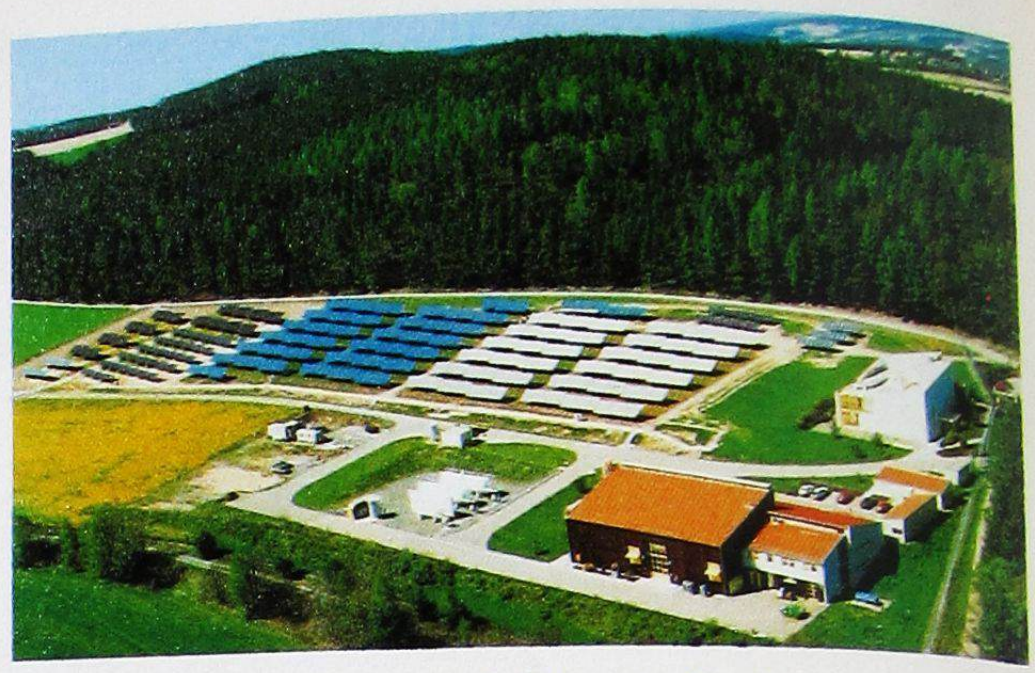


Abb. 118.1. Solar-Wasserstoff-Anlage in Neunburg vorm Wald

für die man jedoch einen großen technischen Aufwand benötigt und viel Energie aufwenden muss.

Zur Erprobung der Solar-Wasserstoff-Technik wurde im Jahr 1990 in Neunburg vorm Wald in der Oberpfalz eine weltweit einmalige Pilotanlage in Betrieb genommen *(Abb. 118.1.)*. In ihr geben 8500 Solarmodule im Jahr 360 000 kWh Energie ab; das reicht zur Versorgung von etwa 90 Haushalten.

10.2.4. Passive Nutzung der Sonnenenergie

Eine passive Nutzung der Sonnenenergie wird allein durch eine geeignete Gestaltung der Gebäude erreicht: Sie absorbieren in der kühlen Jahreszeit in ihrem Inneren möglichst viel Sonnenstrahlen, wandeln sie in Wärme um, speichern sie und geben sie an die Innenräume ab. Man erreicht dies durch doppelt oder dreifach verglaste Südfenster, Fußböden und Wände, die viel Wärme speichern können und ein Abschließen des Hauses nach Norden. Die *Abb. 118.2.a), b)* und *Abb. 119.1.a), b)* zeigen die Wirkungen solcher Baumaßnahmen im Winter und im Sommer.

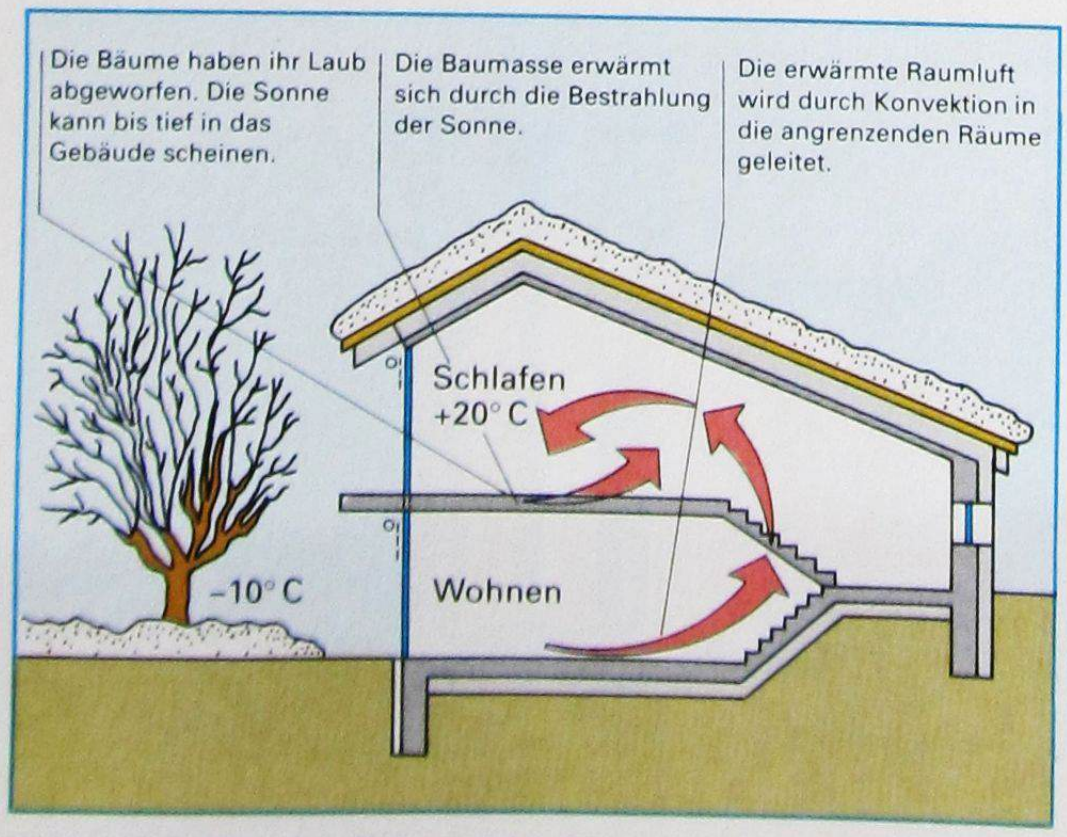


Abb. 118.2. Passive Nutzung der Sonnenenergie im Winter

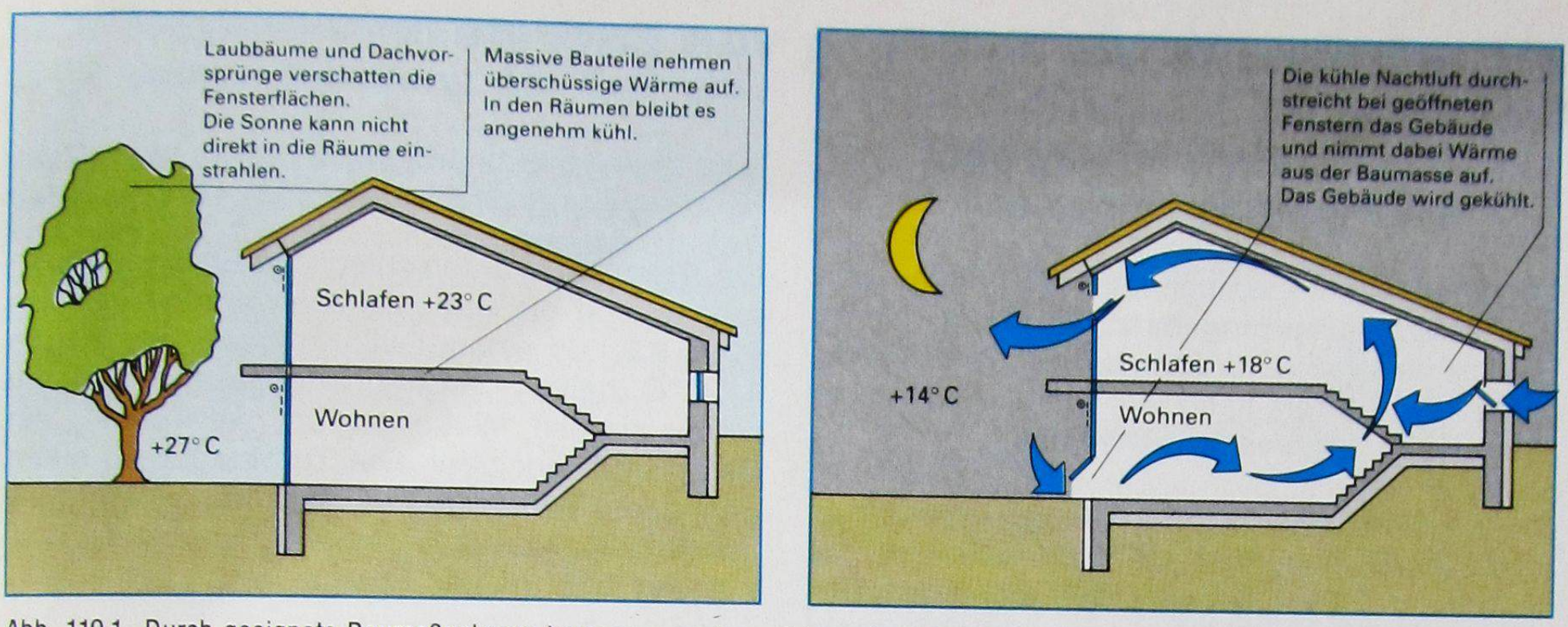


Abb. 119.1. Durch geeignete Baumaßnahmen kann man auch erreichen, dass das Gebäude im Sommer angenehm kühl bleibt.

Zusammenfassung

1. Die Energie der Sonnenstrahlung kann thermisch genutzt werden durch Sonnenkollektoren, Sonnenöfen und Solartürme.
2. Solarzellen (Photovoltaik-Anlagen) wandeln die Sonnenenergie direkt in elektrische Energie um.
3. Mit Hilfe der Solar-Wasserstoff-Technik kann die Sonnenenergie gespeichert werden.

Aufgaben

1. Erkläre den Aufbau und die Funktionsweise eines Sonnenkollektors.
2. Wie wird die Sonnenenergie in einem Solarturm genutzt?
3. a) Wie funktioniert eine Solarzelle?
b) Skizziere die Spannungs-Strom-Kennlinie einer Solarzelle.
4. Welche Vorteile haben Photovoltaik-Anlagen?
5. Erläutere, wie man mit Hilfe von Wasserstoff Sonnenenergie speichern kann.
6. Durch welche Baumaßnahmen erreicht man eine passive Nutzung der Sonnenenergie?
7. Die Solarzellen eines Taschenrechners haben 3 cm Länge und 1 cm Höhe. Welche Leistung können sie bei einer Bestrahlung mit 1000 $\frac{W}{m^2}$ abgeben, wenn der Wirkungsgrad 10 % beträgt?

II. Rationelle Verwendung von Energie

II.1. Energieentwertung bei Energieumwandlungen

Für Energieumwandlungen gilt ganz allgemein der **Energieerhaltungssatz**: *Es geht weder Energie verloren noch kann sie aus dem Nichts entstehen.* Energie kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Die einzelnen Energieformen haben aber einen unterschiedlichen „Wert". Mit *elektrischer Energie* kann man z. B. Motoren antreiben und sie damit im Idealfall zu 100 % in *mechanische Energie* umwandeln. Elektrische Energie kann aber auch vollständig in Wärme, d. h. in *innere Energie* umgewandelt werden. Je nach Bauart des „Umwandlungsgerätes" lassen sich dabei beliebig hohe Temperaturen erreichen. Dagegen sind dem umgekehrten Vorgang von Natur aus Grenzen gesetzt: Ein Teil der inneren Energie geht immer als *Abwärme* an die Umgebung verloren (siehe Kap. 9.2.). Man sagt: Die elektrische Energie hat eine höhere *Wertigkeit* als die innere Energie.

Die Wertigkeit der inneren Energie hängt von der Temperatur ab. Je höher die Temperatur, desto höher ist die Wertigkeit. Mit 1100 °C heißen Gasen lassen sich verschiedene Metalle, wie z. B. Silber, verflüssigen (Schmelztemperatur 961 °C) oder chemische Prozesse in Gang halten („Prozesswärme"), was z. B. mit nur 500 °C heißen Gasen nicht mehr geht.

Bei jeder Energieumwandlung wird die Wertigkeit der Energie kleiner; man sagt: Es findet eine **Energieentwertung** statt. Wird elektrische Energie zum Antrieb eines Motors verwendet, dann ist die Energieentwertung gering (Reibungsverluste); verwendet man sie dagegen zur Raumheizung, dann ist ihre Entwertung groß; man hat sie „unter Wert verheizt".

Ein Beispiel für unterschiedliche Energieentwertungen sind die verschiedenen Kraftwerkstypen (Kap. 9.2.): In einem GuD-Kraftwerk werden die 1100 °C heißen Verbrennungsgase mit einem relativ großen Wirkungsgrad „verwertet", ein Dampfkraftwerk oder eine Turbine haben einen geringeren Wirkungsgrad. Strömen die Verbrennungsgase ungenutzt ins Freie, dann ist die Entwertung ihrer inneren Energie besonders groß.

Versuch

Wir entzünden eine Bunsenbrennerflamme und lassen sie zuerst kurze Zeit brennen. Dann erhitzen wir mit ihr den einen Schenkel eines Thermoelements, dessen anderer Schenkel in ein Glas mit Wasser taucht, das Eiswürfel enthält *(Abb. 120.1.)*. Wir weisen den Strom im Thermoelement durch sein Magnetfeld nach.
Erklärung. Zuerst wird die innere Energie der Verbrennungsgase nicht genutzt; ihre Entwertung ist „maximal"; danach wird sie teilweise in elektrische Energie umgewandelt; die Entwertung ist geringer.

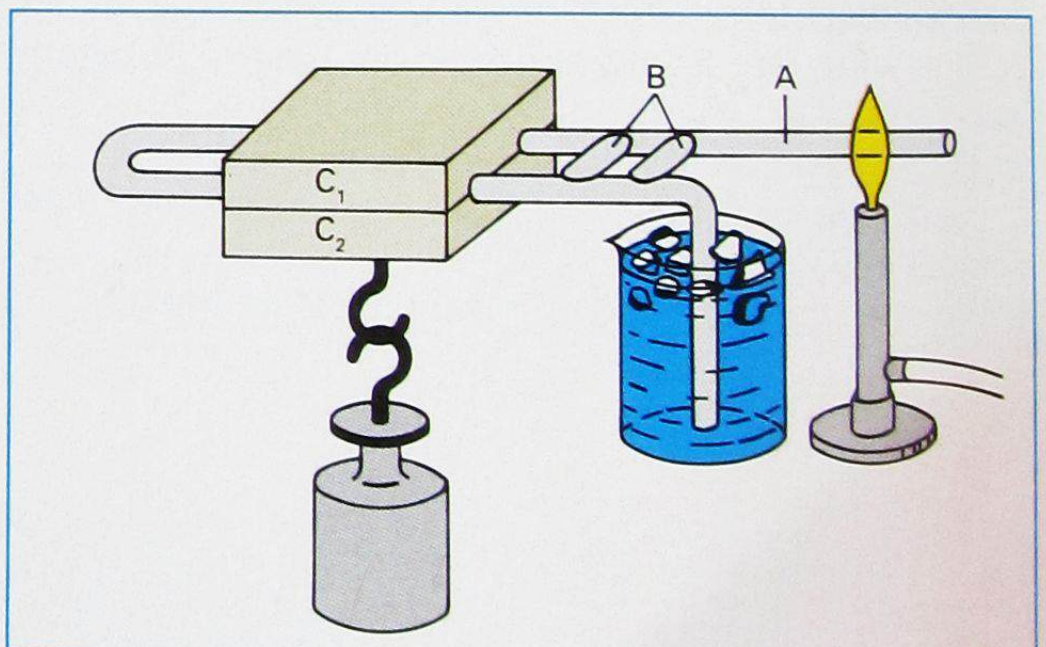


Abb. 120.1. Verringern der Energieentwertung eines Thermoelements

Zusammenfassung

Energiewertigkeit und Energieentwertung beschreiben den Wert, d. h. die Verwendbarkeit der verschiedenen Energieformen.

Aufgaben

1. Welche Energieformen haben einen größeren „Wert"?
a) die elektrische Energie oder die Energie von 1100 °C heißen Verbrennungsgasen,
b) die Energie von 1100 °C heißen Verbrennungsgasen oder die Energie von 500 °C heißem Wasserdampf?
2. Wie kann man die Entwertung bei der Abkühlung von heißen Gasen verringern?

11.2. Möglichkeiten zur sparsamen Nutzung der Energie

Die Versorgung mit ausreichend Energie ist eine entscheidende Voraussetzung für den vergleichsweise hohen Lebensstandard, in dem wir zur Zeit leben. Da jede Energieumsetzung mit einer Beeinflussung der Umwelt verbunden ist, müssen wir sorgfältig und sparsam mit der Energie umgehen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

1. Senkung des Energiebedarfs,
2. Vermeiden unnötiger Verluste,
3. Verbesserung der Wirkungsgrade und
4. Rückgewinnung von Energie.

Der Anteil der privaten Verbraucher am gesamten Energieumsatz in Deutschland ist in der letzten Zeit ständig angestiegen; zur Zeit liegt er bei etwa 40 %. Jeder von uns ist damit aufgefordert, seinen Beitrag zur sinnvollen Nutzung der Energie zu leisten.

Den größten Anteil am privaten Energieverbrauch hat die *Raumheizung*, gefolgt von den *privaten Kraftfahrzeugen*, der *Warmwasserzubereitung* und den *Haushaltsgeräten* einschließlich Lampen *(Abb. 121.1.)*.

Am Beispiel der *Raumheizung* soll beispielhaft gezeigt werden, wie wir Energie sparen können. In *Abb. 121.2.* sind die prozentualen Wärmeverluste eines Einfamilienhauses aufgeführt.

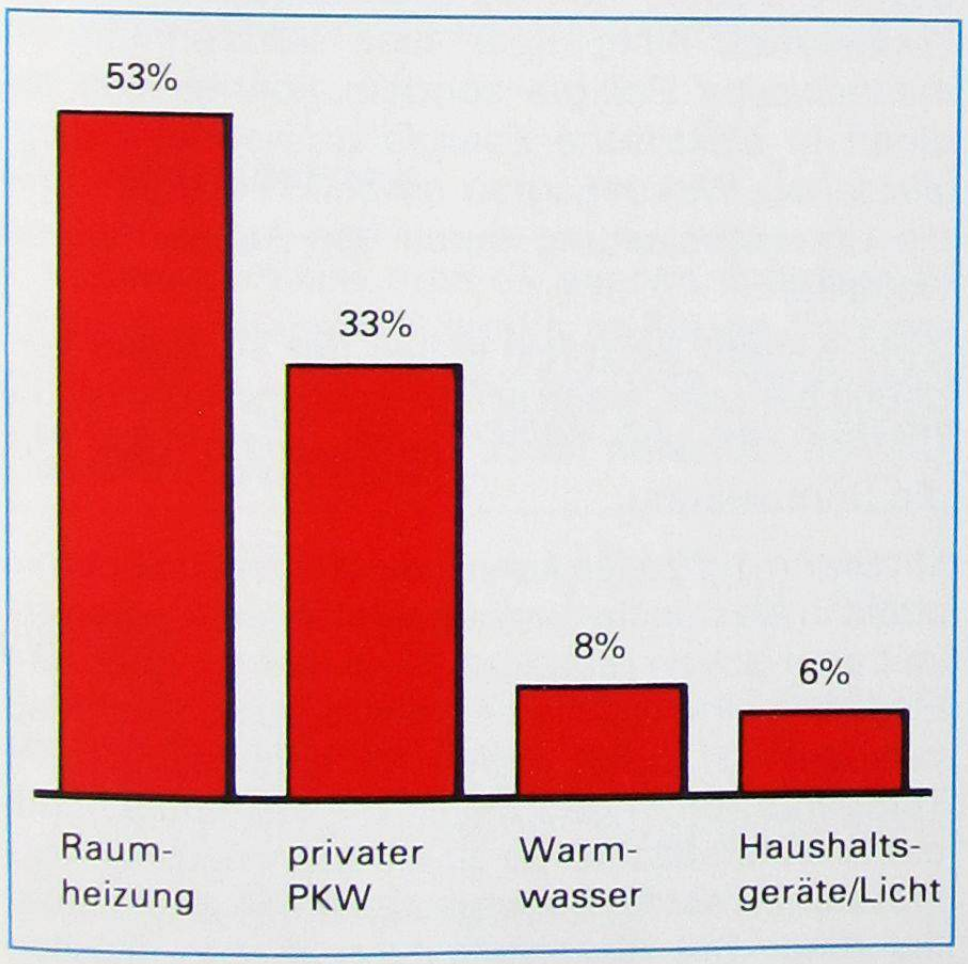


Abb. 121.1. Energieverwendung beim privaten Verbrauch

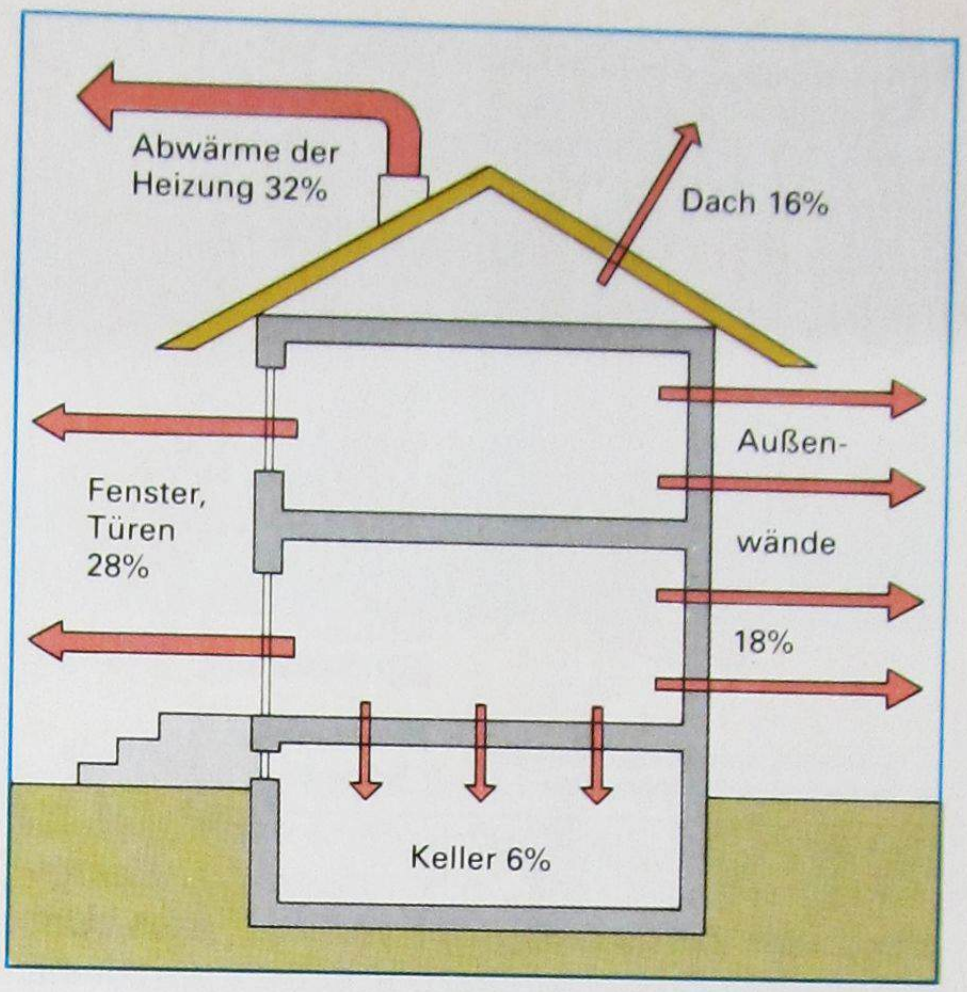


Abb. 121.2. Wärmeabgabebilanz eines Einfamilienhauses

Etwa 40 % gehen durch die Wände, durch das Dach und die Kellerdecke verloren. Durch Isolier- und Wärmedämmschichten sowie durch einen wärmedämmenden Putz des Hauses kann man unnötige Verluste vermeiden (Punkt 2. der oben aufgeführten Möglichkeiten zur Einsparung von Energie). Fenster kann man wirkungsvoll abdichten und durch besser isolierende Gläser (Mehrfachgläser mit spezieller Beschichtung) ersetzen. Durch richtiges Lüften (mehrmals täglich fünf Minuten die Fenster ganz aufmachen statt sie ständig etwas kippen) vermeidet man ebenfalls unnötige Verluste.

Eine Senkung des Energiebedarfs (vgl. Punkt 2.) erreicht man durch eine geringere Raumtemperatur; pro 1 °C Absenkung ergeben sich bis zu 7 % Ersparnis der Heizungsenergie.
Wechselt man eine veraltete Heizung durch eine aus, die auf dem neuesten Stand der Technik steht (Niedertemperaturanlage mit einer wirkungsvollen Regelung), dann spart man Energie durch den verbesserten Wirkungsgrad (vgl. Punkt 3.).

Für große Gebäude oder für die Heizung von ganzen Stadtteilen kann es sich rechnen, Strom und Wärme mit Hilfe der *Kraft-Wärme-Kopplung* zu erzeugen; das sind (meist kleine) Heizkraftwerke, in denen die Abwärme bei einer so hohen Temperatur anfällt, dass man sie zur Heizung benutzen kann.
Der Wirkungsgrad zur Produktion der elektrischen Energie sinkt dadurch, der Gesamtwirkungsgrad

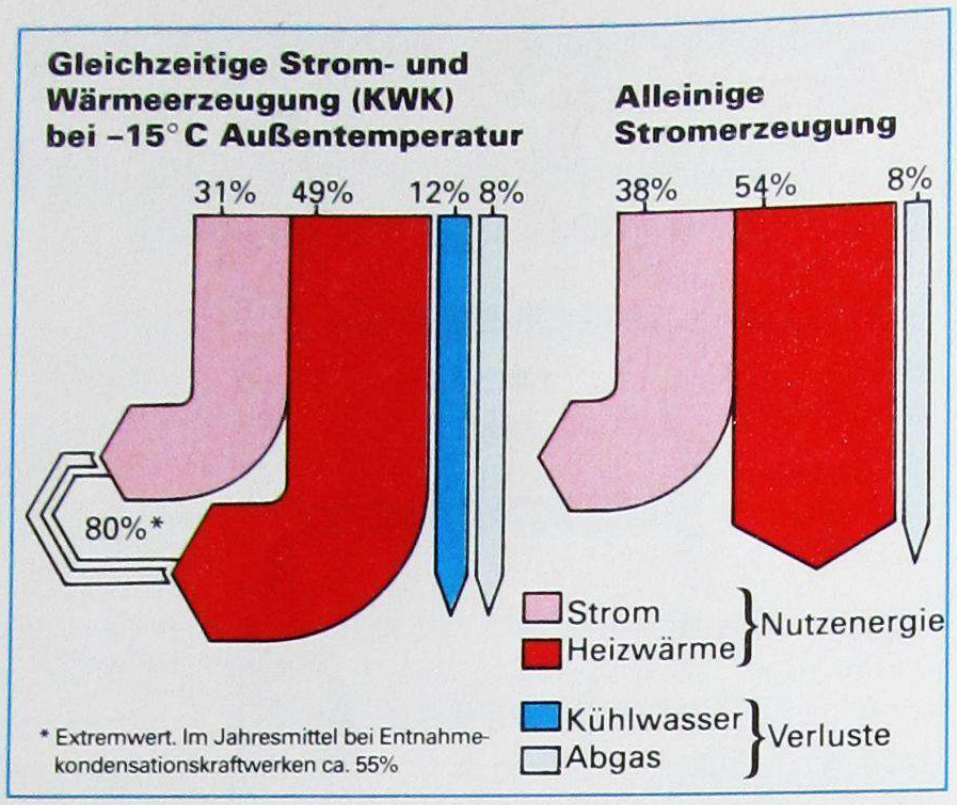


Abb. 122.1. Kraft-Wärme-Kopplung

steigt aber bis zu 85 % *(Abb. 122.2.)*; man benötigt weniger Brennmaterial und schont die Umwelt durch eine verminderte Abgabe von Kohlenstoffdioxid und anderen Schadstoffen. Die Kraft-Wärme-Kopplung spart damit Energie durch Erhöhung des Wirkungsgrades (vgl. Punkt 3. der auf S. 121 aufgeführten Möglichkeiten).

Mit einer *Wärmepumpe* kann man Energie z. B. von Abwässern rückführen (vgl. Punkt 4.) und sie z. B. zur Raumheizung nutzen. Man kann mit ihr aber auch die innere Energie des Grundwassers oder der Luft nutzen. Das Funktionsprinzip ist in *Abb. 122.2.* dargestellt. Zum Transport der Wärme z. B. aus dem Grundwasser in die Heizung dient eine Substanz, die bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur verdampft und dabei dem Grundwasser Wärme entzieht *(Verdampfer)*. Das gasförmige Arbeitsmittel wird nun mit Hilfe eines Kompressors verdichtet und in den *Verflüssiger*

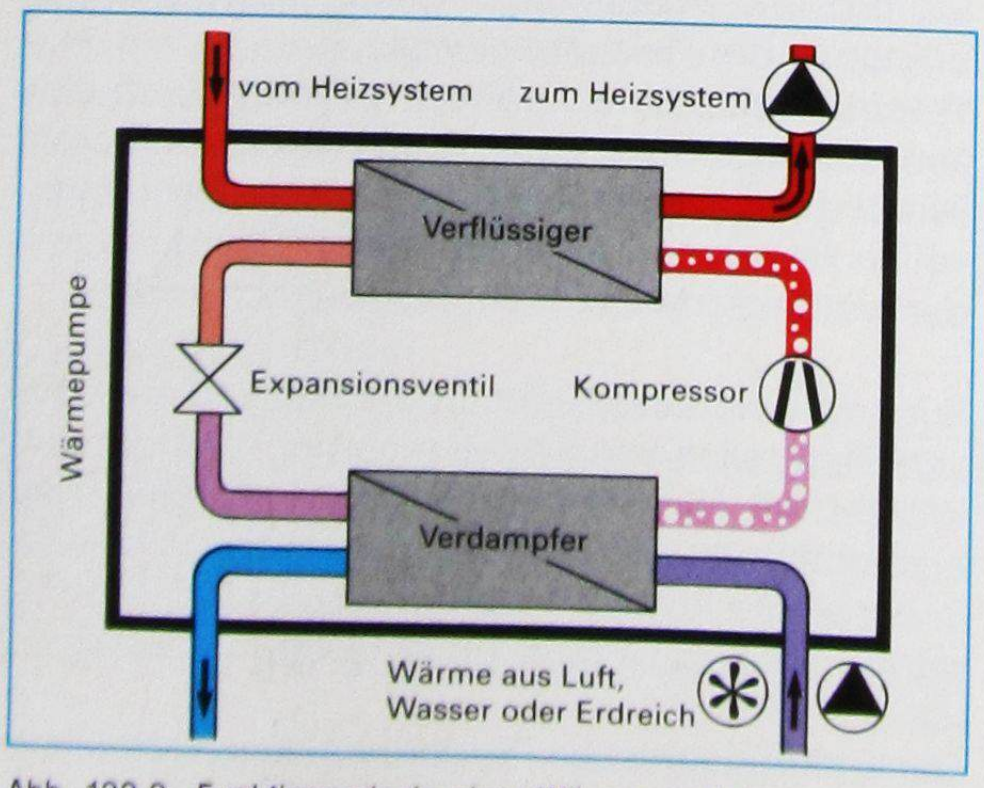


Abb. 122.2. Funktionsprinzip einer Wärmepumpe

gedrückt; dabei erwärmt es sich ähnlich wie die Luft, die in einer Fahrradpumpe zusammengepresst wird.

Der höhere Druck bewirkt, dass sich das Arbeitsmittel verflüssigen und dabei bei einer höheren Temperatur die Verdampfungswärme wieder abgeben kann, die es aus dem Grundwasser entnommen hat. Über das Expansionsventil, das den hohen Druck im Verflüssigerteil aufrecht erhält, strömt die Flüssigkeit wieder zur Wärmeaufnahme in den Verdampfer zurück. Das Ergebnis: Innere Energie mit niedriger Temperatur wird durch mechanische Energie in höherwertige innere Energie mit größerer Temperatur verwandelt. Die Wärmepumpe arbeitet damit wie ein Kühlschrank, bei dem jedoch die Energieaufnahme des Verdampfers zum Abkühlen und nicht die Energieabgabe des Verflüssigers zur Erwärmung genutzt wird.

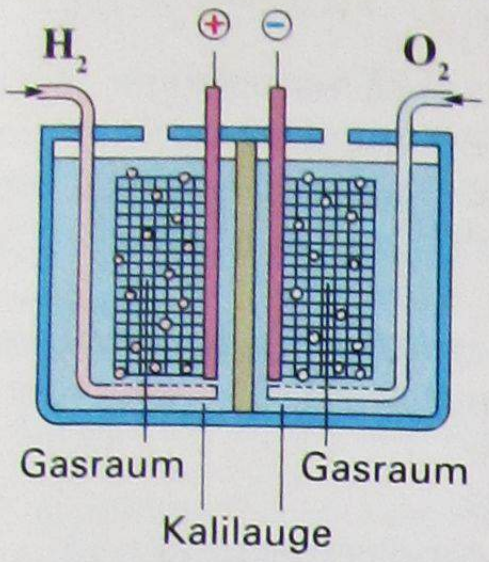
Die Fortschritte in der sparsamen und umweltschonenden Verwendung von Energie ergeben sich nicht von alleine; sie sind Ergebnisse einer oft umfangreichen *Forschungs- und Entwicklungsarbeit.*

Als Beispiele wurden bereits die Forschungen an einem **Fusionsreaktor** (Kap. 9.3.7., S. 111) und die Erprobung der *Solar-Wasserstoff-Technik* in Neunburg vorm Wald (Kap. 10.2.3., S. 117) genannt.

Die Energiebilanz hat sich bei Kraftfahrzeugen trotz aller Fortschritte bei der Entwicklung neuer Diesel- bzw. Ottomotoren nicht entscheidend verbessert. Müsste man die *chemische Energie* des Treibstoffes nicht über eine Verbrennung in *mechanische Energie* sondern könnte man sie direkt in *elektrische Energie* umwandeln, dann würde der Wirkungsgrad erheblich steigen, und die Umweltbelastung durch den Auspuff würde wegfallen.

Zwei weitere Beispiele sollen den Aufwand verdeutlichen, der, wenn er von Erfolg gekrönt ist, die Umwelt entlasten kann: die Brennstoffzelle und die Supraleitung.

Mit *Brennstoffzellen* kann man chemische Energie direkt in elektrische umwandeln. Zwar arbeiten sie im Labor schon recht gut *(Abb. 123.1.)*, aber zum Einsatz in einem Auto sind sie viel zu schwer. Man versucht nun, durch andere Materialien und hohe Temperaturen in den Zellen die Leistungsdichte der Brennstoffzellen so zu erhöhen, dass sie vorerst zumindest für Busse im Stadtverkehr einsetzbar sind. Die Abgasbelastung in den Städten könnte sich reduzieren. Ein wesentliches Anliegen



Sauerstoff und Wasserstoff verbinden sich hier langsam zu Wasser. Als Ionenleiter dient Kalilauge. Die Reaktion findet an den Elektrodenoberflächen (Nickel) statt, die gleichzeitig als Katalysator dienen.

Abb. 123.1. Brennstoffzelle

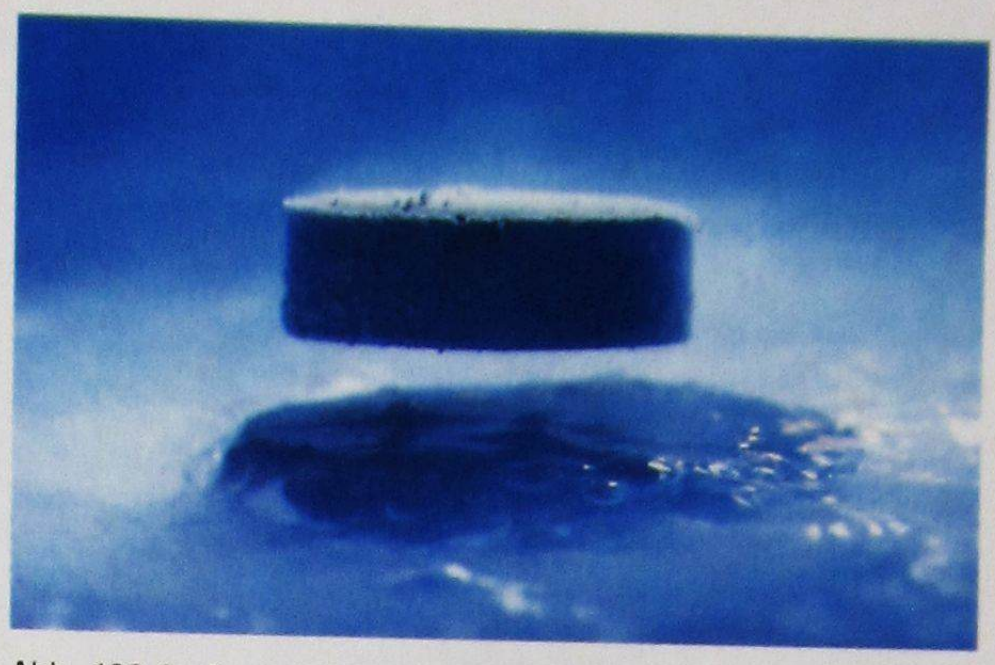


Abb. 123.2. Supraleitung

der Forschungsarbeit ist dabei auch, dass bei der Herstellung der Zellen möglichst wenig Schadstoffe entstehen und im Falle eines Defekts oder eines Unfalls die Umweltbelastung möglichst gering ist.

Das zweite Beispiel ist die *Supraleitung (Abb. 123.2.)*. Mit ihr kann man elektrische Energie völlig verlustfrei transportieren. Der Widerstand eines Supraleiters ist exakt 0; ein einmal in Gang gesetzter Strom fließt ohne Spannung tagelang weiter.

Dieser Vorteil wird aber durch die tiefen Temperaturen erkauft, die zur Supraleitung notwendig sind. Bis vor kurzem musste man die Metalle, die zur Supraleitung geeignet sind, bis auf wenige °C über dem absoluten Nullpunkt –273 °C abkühlen. Das ist nur mit flüssigem Wasserstoff oder flüssigem Helium möglich, was sehr energieaufwendig ist. Trotzdem hat das Forschungszentrum einer großen Elektrofirma die Möglichkeit untersucht, die elektrische Energie durch ein supraleitendes Erdkabel zu transportieren. Das Ergebnis war: Der technische Aufwand rentiert sich nur, wenn man sehr große elektrische Energien transportieren muss. Die elektrische Versorgung von Tokyo mit so einem supraleitenden Kabel wurde ernsthaft in Erwägung gezogen, unter anderem auch deswegen, weil ein genügend großer Graben für das Erdkabel bereits vorhanden war.

Inzwischen hat man *Hochtemperatursupraleiter* entdeckt, die nur bis auf die Temperatur von flüssiger Luft abgekühlt werden müssen. Der Aufwand zur Leitung von elektrischer Energie würde sich dadurch erheblich vermindern. Die Materialien, die die Hochtemperatursupraleitung zeigen, sind aber zum Transport hoher elektrischer Energie ungeeignet. Weitere Forschungsarbeit ist also notwendig.

Zusammenfassung

1. Energie kann man einsparen, indem man den Energiebedarf senkt, unnötige Verluste vermeidet, die Wirkungsgrade verbessert und dort, wo es möglich ist, die Energie wieder zurückführt.

2. Für den weiteren Fortschritt in der Energienutzung ist ein großer Aufwand an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig.

Aufgaben

1. Wie groß ist der Anteil der privaten Verbraucher an der Energieumsetzung in ganz Deutschland?
2. Wie teilt sich der private Energieumsatz auf?
3. Welche Möglichkeiten gibt es, Energie bei der Raumheizung zu sparen?
4. Wie arbeitet eine Wärmepumpe?
5. Was ist eine Brennstoffzelle?
6. a) Was ist Supraleitung?
b) Wie kann man mit der Supraleitung Energie sparen?
7. Schreibe alle elektrischen Geräte auf, die du während eines Tages nutzt. Schreibe die Geräte, auf die du glaubst, am ehesten verzichten zu können, an die ersten Stellen der Liste. Vergleiche mit deinen Nachbarn.
8. Führe ein „Energietagebuch“: Schreibe dazu alle Energien auf, die du durch dein Handeln umsetzt.

12. Projektorientierte Themen

Die folgenden Themenstellungen sind in erster Linie als Anregungen gedacht, in Zusammenarbeit mit Klassenkameraden umfangreichere Aufgaben durchzuführen. Dabei sollt ihr Teilaufgaben in kleineren Gruppen und eventuell auch zu Hause durchführen. Euere Ergebnisse könnt ihr vor der ganzen Klasse oder z. B. in einer Ausstellung für die Schule vorführen. Es sind euere eigenen Ideen gefragt, mit denen ihr die Vorschläge bereichern, ergänzen oder abändern könnt.

12.1. Wir kochen umweltfreundlich

Jede Energieumsetzung belastet die Umwelt. Da die privaten Haushalte über ein Drittel der gesamten Energie in Deutschland „verbrauchen", liegt es nahe, dass jeder Einzelne überlegt, wie er zu Hause Energie sparen kann.

Einen wesentlichen Anteil am häuslichen Energieumsatz hat das Kochen. Wir wollen deshalb zuerst experimentell feststellen, wie viel Energie beim Kochen umgesetzt wird. Um die verschiedenen Kochgeräte miteinander vergleichen zu können, erhitzen wir mit ihnen Wasser und untersuchen, wie der Wirkungsgrad von der erhitzten Wassermenge, von der Endtemperatur, von der Art der Töpfe usw. abhängt. Im Einzelnen vergleichen wir:

12.1.1. Kochplatten, Keramikkochfelder
12.1.2. Gasbrenner, Campingkocher, Bunsenbrenner
12.1.3. Mikrowellengeräte
12.1.4. Tauchsieder
12.1.5. Kaffeemaschinen

Mit den experimentell gewonnenen Werten können wir dann Regeln zum umweltschonenden Kochen aufstellen. Diese Regeln können wir schließlich durch Unterlagen von Energieversorgungsunternehmen vervollständigen.

2.2. Woher kommt die Energie, die wir umsetzen?

Der Strom kommt aus der Steckdose, das Erdgas aus dem Gasanschluss, das Benzin von der nächsten Tankstelle, wirklich??

Um herauszufinden, wo die Energieträger, die wir nutzen, tatsächlich herkommen, sammeln wir zuerst Material. Dazu schreiben wir, soweit möglich, die folgenden Stellen an oder besuchen sie:

12.2.1. Elektrizitätsversorgungsunternehmen in unserer Stadt
12.2.2. Heizkraftwerk
12.2.3. Umspannwerk
12.2.4. Großhändler für Brennstoffe
12.2.5. Das nächstgelegene Kraftwerk (Kohlekraftwerk, Wasserkraftwerk)
12.2.6. Gasversorgungsunternehmen

Das so erhaltene Informationsmaterial verarbeiten wir zu Tabellen, Graphiken usw., die wir unseren Mitschülern z. B. auf einer Wandtafel am Schulfest präsentieren. Durch Demonstrationsversuche, etwa zur Übertragung elektrischer Energie mit Hochspannungstechnik, können wir unsere Ausstellung noch attraktiver gestalten.

12.3. Wir nutzen die Sonnenenergie

Bei der Energieversorgung wird wohl die Sonnenenergie eine immer größere Rolle spielen. Wir wollen untersuchen, welche Vorteile aber auch welche Probleme die Sonnenenergie mit sich bringt. Dazu sammeln wir einerseits Material und bauen andererseits möglichst einfache Versuchsanordnungen auf, mit denen wir die Nutzung der Sonnenenergie demonstrieren und untersuchen können. Die folgenden Möglichkeiten wollen wir genauer betrachten:

12.3.1. Heizen mit Sonnenkollektoren verschiedener Bauart
12.3.2. Warmwasserversorgung mit Sonnenkollektoren
12.3.3. Stromerzeugung mit Solarzellen
12.3.4. Dampferzeugung mit Sonnenspiegeln
12.3.5. Kochen mit Sonnenspiegeln
12.3.6. Geeignete Baumaßnahmen zur passiven Nutzung der Sonnenenergie

Anhand unserer Versuchsergebnisse, des gesammelten Materials und der Kontrollrechnungen erarbeiten wir Bedingungen, unter denen eine Nutzung von Sonnenenergie schon heute lohnend ist.

Stichwortverzeichnis

α-Strahlen 80 f.
β-Strahlen 80 f.
γ-Strahlen 80 f., 89
α-Zerfall 80
β-Zerfall 80
ABELSON, PHILIP HAUGE 90
abgeleitete Größe 6, 12
Abhängigkeit der elektrischen Arbeit W_{el} von der Spannung U 11
Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Stärke des Magnetfeldes 35
Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leiters von seiner Temperatur 22
Ablenkung des Elektronenstrahls bei einer Fernsehbildröhre 72
Ablenkung eines Elektronenstrahls 70
Abwärme 100 f., 120
Abwasser, Menge und Herkunft 102
Adlernebel 112
Altersbestimmung 85, 93
Altersbestimmung archäologischer Objekte 94
Ampere 6
Änderung der Magnetfeldstärke 36
Anode 59, 118
Anwendung der Glimmentladung 61
Anwendung der Radioaktivität 93
Anwendungen der Elektronenstrahlröhre 71
Äquivalenz (Gleichwertigkeit) von Masse und Energie 87
Arbeit, mechanische 13
Arbeitszeit 9
Atombomben 90
Atome und ihr Aufbau 74
Atomhülle 76
Atomkern 74, 76
Atommodelle 74
Atomzeitalter 84, 90
Aufbau eines Transformators 48
Aufbau von Atomkernen 75
Ausbreitung der Elektronenstrahlen im feldfreien Raum 68
Außenpolgeneratoren 46 f.
Autoradiographien 78

bandförmige Elektronenstrahlbündel 69
Bau eines Transformators 48
BECQUEREL, ANTOINE-HENRI 83, 91
belasteter Transformator 48
Beleuchtung 65
Bestimmung von Widerständen 20
BETHE, HANS ALBRECHT 88
Bethe-Weizsäcker-Zyklus 88 f.
Betriebsdaten 16
Betriebsspannung 15 ff.
Betriebsstrom 15, 16 ff.
Betriebswiderstand 15
Betriebszeit 21
Bewegungsenergie 105
Bezirksumspannwerke 54
Bildröhre 71
Bleiisotop 86
Blitz 63 ff.
Blitzableiter 62
Blitzeinschläge 64
Boden 100
Boden, Belastungen 102
Bodenversauerung 102
BOHR, NIELS HENDRIK DAVID 74, 77, 90
BRAUN, KARL FERDINAND 71, 73
Braunkohle 97 f., 107
braunsche Röhre 71 f.
Bremsmittel 88
Brennelemente, abgebrannte 110
Brennelementlager, zentrales 110
Brennelementlagerung 110
Brennstäbe 110
Brennstoffzellen 122 f.
BROWN, ROBERT 77
brownsche Bewegung 77
Brutreaktor 111
BUNSEN, ROBERT WILHELM 32

C-14-Methode 93
CHADWICK, JAMES 77, 86, 90
chemische Elemente 74, 76
Chlorisotop 76
CROOKES, WILLIAM 73
CURIE, MARIE 78, 83, 91
CURIE, PIERRE 78, 83

DALTON, JOHN 77
Dampf, hochgespannter 106
Dampferzeuger 106
Dampfkraftwerk 106 f.
Dampfturbine, Bauprinzip 106
Dampfturbinenkraftwerk, Funktionsschema 107
Definitionsgleichung 6
DEMOKRIT 77
Deuterium 89
Deutung des glühelektrischen Effekts 66 f.
diagnostische Zwecke 93 f.
Diode 66, 72
Donner 63 f.
Doppel-T-Anker 46
Dosimeter 93
Driftbewegung elektrisch positiv geladener und negativ geladener Ionen 57
Drossel 62
Drosselspule 43
Durchdringungsfähigkeit radioaktiver Strahlung 82
Durchschnittswerte der jährlichen Gesamtstrahlungsleistung 114
dynamoelektrisches Prinzip 55

Edelgas 61
EDISON, THOMAS ALVA 58, 66
Edison-Effekt 68
EINSTEIN, ALBERT 87 f.
Einzelspannung 28
Einzelwiderstand 27 f.
Eiszeit 103
elektrisch negativ geladene Ladungsträger 59
elektrisch positiv geladene Ladungsträger 59
elektrische Arbeit 6 f., 9, 12
elektrische Arbeit, Einheit 12
elektrische Arbeit, Messung 8
elektrische Energie 6, 8, 33
elektrische Energie, Umwandlung 12
elektrische Influenz 63
elektrische Kraft 7
elektrische Leistung 6, 15
elektrische Leistung, Einheit 15
elektrische Spannung 6
elektrische Spannung als abgeleitete Größe 11
elektrische Spannung, Einheit 6, 12
elektrische Stromstärke 6
elektrischer Strom 6
elektrischer Transformator 38
elektrischer Widerstand 18 f., 20, 26
elektrischer Widerstand, Definition 19
elektrischer Widerstand, Einheit 19, 20
elektrischer Widerstand, Temperaturabhängigkeit 22
elektrisches Messinstrument 55
elektrisches Schmelzen 52
Elektrizitätsleitung im Vakuum 65
Elektrizitätsleitung in Gasen 56
Elektrizitätsquelle 8
Elektrizitätswerk 52 ff.
Elektrizitätszähler 14
Elektrolyseanlage 13
elektromagnetische Induktion 33, 38
Elektromotor 12 f., 38
Elektronen 62, 75 f.
Elektronenhülle 74
Elektronenkanone 68
Elektronenmangel 33
Elektronenstrahlen 68, 70, 72
Elektronenstrahlen im feldfreien Raum 69
Elektronenstrahlröhre 68
Elektronenstrahlschatten 69
Elektronenstromrichtung 34, 70
Elektronenstromrichtung mit der UVW-Regel der linken Hand 35
Elektronenüberschuss 33
Elektronik 72
Elektrostahl-Verfahren 65
Elektrotechnik 55
Elektrizitätswerk 47
Elmsfeuer 64 f.
ELSTNER 83
Emission radioaktiver Elemente 94
Endenergie 95
Energie der radioaktiven Strahlung 81
Energie, chemische 13 f., 122
Energie, elektrische 105 f., 119, 122
Energie, erwünschte (nutzbare) 14
Energie, innere 12, 106, 120
Energie, kinetische 13
Energie, magnetische 13

Energie, mechanische 14, 120, 122
Energie, Möglichkeiten zur sparsamen Nutzung 121
Energie, potentielle 12 f.
Energie, primäre 95
Energie, rationelle Verwendung 120
Energiebedarf 97
Energiebilanz 121 f.
Energieentwertung 120
Energieentwertung eines Thermoelements 120
Energieerhaltungssatz 120
Energieformen 12, 14
Energiefreisetzung bei der Kernspaltung 87
Energiequelle, erneuerbare 98
Energiequelle, regenerative 96, 98 f.
Energiesparlampe 62
Energiestrom 13
Energieträger 95
Energieträger, fossiler 96
Energieträger, primärer 95 f.
Energieträger, regenerativer 96
Energieträger, sekundärer 95 f.
Energieumsetzung 95
Energieumwandlung 39, 95, 120
Energieverbrauch 95
Energieverlust 13 f., 50
Energieverwendung beim privaten Verbrauch 121
Energievorrat 97
Energiewerk 95
Energiewirtschaftszweige 99
Entdeckung der elektromagnetischen Induktion 38
Entladungsröhre 66
Entsorgung 110
Entsorgung, nukleare 110
Entstehung der Atomtheorie 77
Entstehung der Wechselspannung 44
Entwicklung des Primärenergiebedarfs in Deutschland 99
Entwicklung des Weltenergieverbrauchs 97
Entwicklung des Weltverbrauchs an Primärenergie 97
Erde, Klima 103
Erdgas 97 ff.
Erdöl 97 ff., 100
Erdwärme 96
Ersatzwiderstand 28 f.
erste Kernspaltung 90
Erwärmung 8
Erzeugung und Eigenschaften von Elektronenstrahlen 68

Fahrraddynamo 33
FARADAY, MICHAEL 38, 72
FCKW 103
Feldemission 63, 66
Feldlinien 70
Feldlinien eines Hufeisenmagneten 33
Feldlinien eines Magneten 35
Feldmagnet 46
Feldspule 36 f.
FERMI, ENRICO 77, 90
Fernsehapparate 73
Fernsehbildröhre 71 f.
Fernsehen 73
Fernsehröhre 73
Festwiderstand 26
Fission 111
Flachbatterie 6
FLEMING, JOHN AMBROSE 73
Fluorchlorkohlenwasserstoff 103
Fluoreszenz 72
fluoreszierender Leuchtstoff 61
Flutlichtanlage eines Stadions 65
FOREST, LEE DE 58
Forschungsreaktoren 108
FOURIER, JEAN-PAPTISTE-JOSEPH DE 21
FRANKLIN, BENJAMIN 62
FRISCH, OTTO ROBERT 90
Funkenentladung 63, 65
Funktionsprinzip eines Geigerzählers 84
Funktionsweise eines Generators 48
Funktionsweise eines Wechselstromgenerators 44
Fusion 88, 111 f.
Fusionsenergie 112
Fusionsreaktoren 111
Fusionsreaktion 122

Galvanometer 38
GAMOW, GEORGE 88
Gas-Ionen 57
Gase als Isolatoren 56
Gase als Leiter 57
Gase als sehr schlechte Leiter 56
Gaskraftwerk 107
Gasturbinenkraftwerk 106 f.
Gasturbinenkraftwerk, Funktionsschema 107
Gefahren und Nutzen der radioaktiven Strahlung 91
GEIGER, JOHANNES WILHELM 83
Geiger-Müller-Zählgerät 79
Geiger-Müller-Zählrohr 79
Geigerzähler 84
GEISSLER, JOHANN HEINRICH WILHELM 73
GEITEL 83
Generator 33, 38
genetische Schädigungen 92, 94
Gentechnik 94
geothermische Energie 96
Gerätekennwerte 16
Geräteschild 92
Gesamtspannung 27 f.
Gesamtstrahlungsleistung 113
Gesamtstrom 17, 29
Gesamtwiderstand 28 f.
geschätzte Ressourcen 97
Gewässer, umgekipptes 102
Gewerbe 99
Gewitter 63
Gezeitenenergie 96
Gezeitenkraftwerk 105, 112
Gitter-Ion 8
Gleichrichter 73
Glimmentladung 59
Glimmlampen 60, 61
Glimmlicht 64
glühelektrischer Effekt 67 f.
Glühemission 67 f.
Glühemission von Elektronen 65
Glühlampe 18
GOLDMARK, PETER CARL 73
GOLDSTEIN, EUGEN 73
Graphit 88, 108
Graphit als Moderator 109
Gravitation 112
GRAY, STEPHEN 58
Größengleichung 11, 24
Großgenerator 47
Grundbegriffe der Energiewirtschaft 95
Grundgröße 6, 12
Grundlagen der Atom- und Kernphysik 74
GuD-Kraftwerk 107, 120

HAHN, OTTO 87, 90
Handel 99
Handwerk 100
Hauptspannwerk 54
Haushalte 99
HEISENBERG, WERNER 74
HENRY, JOSEPH 38
Herstellung künstlicher radioaktiver Isotope 108
HERZT, HEINRICH RUDOLPH 58
HESS, VIKTOR FRANZ 84
Hintereinanderschaltung 27 f.
Hintereinanderschaltung von Widerständen 31
Hochspannung 51, 63
Hochspannungsfernleitung 54
Hochspannungsgerät 7
Hochspannungstransformatoren 51, 54
Hochstromtransformator 51 f.
Höchststromstärke 31
Hochtemperaturreaktoren 111
Hochtemperatursupraleiter 123
hofmannscher Apparat 117
Hubarbeit 7
Hufeisenmagnet 35
Hyperbel 23

Immissionsgrenzwerte 101
Induktion in bewegten geraden Leitern 33
Induktion in Spulen 36
Induktionsspannung 33, 35 ff.
Induktionsspule 36 f.
Induktionsstrom 35
Induktionsstrom, Richtung 33
Induktionsstrom, technische Richtung 34
Industrie 99 f.
Industriewüste 102
Innenpol-Wechselstromgenerator 47
Innenpolgeneratoren 46 f.
innere Energie 7 f.
Ionen 62
Ionisation 56, 58
Ionisation bei Gasteilchen 56
Ionisation eines Gases 58
Ionsationskammer 79
ionisierende Strahlung 57
Isotope 76

Joule 12

kaltes Licht 61
Katalysator 101
Kathode 59
Kathodenstrahl 68
Kathodenstrahloszillograph 71
Kathodenstrahlröhre 73
Keimabtötung 94
Kernbindungsenergie 96
Kernbruchstücke 87
Kernenergie 96 ff., 112
Kernfusion 88 f., 97
Kernkräfte 76
Kernkraftwerk 97, 108
Kernkraftwerk, Auswirkungen auf die Umgebung 109
Kernkraftwerk, Nasskühlturm 109
Kernkraftwerk, Sicherheit 109
Kernkraftwerk, Sicherheitsbarrieren 109
Kernkraftwerke 108
Kernladungszahl 74
Kernreaktion 106
Kernreaktoren 108
Kernspaltung 87
Kernspaltung eines Urankerns 88
Kernumwandlung 85
Kernverschmelzung 88 f.
Kettenreaktion 88, 108
Kettenreaktion, gesteuerte 108
Kettenreaktion, kontrollierte 108
Kiloohm 19
Kilowatt 15
Kilowattstunde 12
KIRCHHOFF, GUSTAV ROBERT 27, 32
kirchhoffsches Gesetz, erstes 29
kirchhoffsches Gesetz, zweites 27
KLAPPROTH, HEINRICH 83
Kleinverbraucher 99
Knallgasprobe 118
Knotenregel 29
Kohle 99 f.
Kohlekraftwerk 98
Kohlenbogenlampe 65
Kohlenlichtbogen 64 f.
Kohlenstoffdioxid 103
Kohlevergasung 107
Koks 107
Kollektor 115
Konstantan 23
kontrollierte Kettenreaktion 90
kosmische Strahlung 56 f., 79, 84, 94
Kraft-Wärme-Kopplung 121 f.
Kraftlinien 38
Kraftwerk 95, 99, 100, 104
Kraftwerktechnologie 97
Krebsbekämpfung 94
Krebsnebel 112
Kühlwasser 109
künstliche Radioaktivität 78
künstliche Kernumwandlung durch Neutronenbeschuss 86
künstliche radioaktive Elemente 86
künstliche Strahlenexposition 91
künstliche Strahlenquelle 92

Ladungspumpe 6
Ladungsträger 57
Ladungsträgerlawine 60
Lageenergie 7, 13, 105
Lastverteilerstellen 54
Läufer 46
Laufwasser 100
Laufwasserkraftwerk 103 f.
Laufwasserkraftwerk, Aufbau 104
Legierungen 22
leidener Flasche 62
Leistung 15
Leistungsabgabe 16
Leistungsaufnahme 15 ff., 52
Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte 16
Leistungsreaktoren 108
Leiter 58
Leiterkennlinie 18
Leiterschaukel 33
Leitungselektron 8
LENZ, HEINRICH, FRIEDRICH 39
lenzsche Regel 39 f., 42
Leuchterscheinungen 62
Leuchterscheinungen bei der Glimmentladung 61
Leuchtfleck 72
Leuchtschirmbeschichtung 78
Leuchtstoffröhre 61 f.
Lichtbogen 63, 65
Lichtbogenschweißen 52
Lichterscheinung bei einer Gasentladung 59
Lichtmaschine 33
Lichtstrahlung 8
LIEBEN, ROBERT VON 58
Lorentzkraft 33, 44 f.
Löschspannung 60
Luft 100

Magnetfeld 37, 80
Magnetfeldänderung 36, 38
magnetisches Längsfeld 70
magnetisches Querfeld 70
magnetisches Streufeld 50
Maschenregel 27
Massenanziehungskräfte 112
Massenzahl 75
MCMILLAN, EDWIN MATTISON 90
mechanische Energie 33
Megaohm 19
Megawatt 15
MEITNER, LISE 90
Messtechnik 94
Metalldampflampe 65
Methan 103
Mineralöl 99
Moderator 88, 108 f.
Module 117
Monozelle 6
MUSCHENBROEK, PIETER VON 62

Nachweis der radioaktiven Strahlung 78
Nachzerfallswärme 110
Natriumdampflampe 65
natürliche Radioaktivität 78
natürliche Strahlenexposition 91
natürliche Strahlenquelle 92
Nebelkammer 79
Neptunium 90
Neutronen 74 ff., 86
Neutronen, langsame 88, 108
Neutronen, schnelle 86 ff.
Neutronenbeschuss 89
Neutronenzahl 77
Newtonmeter 12
Nichtleiter 58
Niederspannungstransformatoren 50, 54
Nitrate 101
Nordpol 36
Nukleonen 74, 76
Nukleonenzahl 75 f.
Nullleiter 31
nutzbare Ladeenergie 12
Nutzenergie 13, 95
Nutzung der Primärenergie in verschiedenen Zeitepochen 97

Öffnungsfunke 42
Öffnungsspannung 42
Ohm 19
OHM, GEORG SIMON 19, 21
ohmsches Gesetz 18, 22
Ölkrise 95
Ölschiefer 97
Ordnungszahl 74, 76
Orts-Trafohäuschen 54
Oszilloskop 71
Oszilloskop, Funktionsprinzip 71
Ötzi 85
Ozon 101

parabelförmige Ablenkung von Elektronenstrahlen in einem elektrischen Querfeld 69
Parallelschaltung 27
Parallelschaltung von Widerständen 29
Parallelwiderstand 31
Pechblende 83
PERRIN, BAPTISTE 73
Phase 31
photoelektrischer Effekt 58
Photovoltaik-Anlage 117, 119
physikalische Größe 26
Plasma 88
PLÜCKER, JULIUS 73
Plutonium 90
Plutonium, spaltbares 111
Polonium 78
Polschuhe 46
Polsuchlampe 61
Primärenergie 99
Primärenergieträger 100
Primärspannung 48 f., 51
Primärspule 49, 54
Primärstrom 49
Primärstromkreis 48
Prinzip des Innenpolgenerators 46
Prinzip von der Erhaltung der Energie 40, 95
Projektionsgerät 65
Protactinium 90
Protonen 74 ff.
Protonenzahl 74, 77
PROUT, WILLIAM 7
Prozesswärme 120
Pumpspeicherkraftwerk 105
Punktschweißen 52

Quecksilberdampflampe 61
Quecksilberhochdrucklampe 65

radioaktive Elemente 82
radioaktive Stoffe 89
radioaktive Strahlung 57 f., 78, 82, 94
radioaktive Substanz 101
radioaktiver Kernzerfall 80
radioaktiver Stoff 56
radioaktiver Zerfall 85
Radioaktivität 83, 100
Radioaktivität, natürliche 101
Radioisotope 85, 89
Radiophosphor 86
Radium 78
Rauchgase 100
Raumheizung 121
Reaktorschutzsystem 109
Reaktortypen 111
Regeltransformator 51
Regen, saurer 102
Reibungsarbeit 7, 16
Reibungskraft 7
Reibungsverlust 120
Reihenschaltung 27 f.
Reihenschaltung von Widerständen 27, 31
Rekombination 57
Rekombination bei Gasteilchen 56
Reserven 98
Reserven, sicher gewinnbare 97
Ressourcen 98
RICHMANN, GEORG WILHELM 62
RÖNTGEN, WILHELM CONRAD 83
Röntgenfilm 78
Röntgenstrahlung 58, 66, 82, 92
Rotationsenergie 96
Rotor 46
RUTHERFORD, ERNEST 74, 77, 84

Sägezahnkippspannung 71 f.
Sauerstoff 118
Schadstoffbelastung der Gewässer 101
Schadstoffquellen, vom Menschen verursachte 100
Schallenergie 13
Schalter 31
Schaltung einer Diode 66
Schaltung elektrischer Geräte im Haushalt 31
Schiebewiderstand 26
Schilddrüsenuntersuchung 94
Schlagbohrer 16
Schleifbürsten 46
Schleifringe 46
Schutzleiter 31
Schwefeldioxid 100 ff.
Schwefelsäure 100
Sekundärelektronenvervielfacher 78
Sekundärenergie 95
Sekundärspannung 48 f., 51
Sekundärspule 49
Sekundärstrom 49
Sekundärstromkreis 48
selbständige Gasentladung 59, 62, 65
Selbstinduktion 41, 43
Selbstinduktion in einem Gleichstromkreis 41
Selbstinduktion in einem Wechselstromkreis 42
Selbstinduktionsspannung 41
Sicherheitsumschließung 109
Sicherung 31
SIEMENS, WERNER VON 55
Signallampe 61
Sinuskurve 45
Sinuslinie 44
SKE 97
Smogalarm 101
Smogkatastrophe 101
Solar-Wasserstoff-Anlage in Neunburg vorm Wald 118
Solar-Wasserstoff-Technik 117, 119, 122
Solarenergie 112
Solarkonstante 112, 114
Solartechniken 115
Solarturm 116, 119
Solarturmanlagen 116
Solarzelle 98, 116, 119
Solarzelle, Aufbau 116
somatische Schädigungen 92, 94
Sonne 100
Sonne, Strahlungsenergie 114
Sonnenenergie 96, 98, 103, 119
Sonnenenergie, passive Nutzung im Winter 118
Sonnenkollektor zur Warmwasserversorgung 115
Sonnenkollektoren 115, 119
Sonnenöfen 115, 119
Sonnenofen-Forschungsanlage 98
Spaltung eines Urankerns 87
Spannung 9
Spannung, elektrische 18
Spannungsabfall 27, 53
Spannungsmessgerät 6
Spannungsteilerschaltung 28
Spannungs-Strom-Kennlinie 116 f.
Speicherkraftwerk 104 f.
Speicherkraftwerk, Aufbau 104
spezifische Wärmekapazität 9
spezifischer Widerstand des Leiters 24
spezifischer Widerstand, Einheit 24 f.
Spitzenentladung 64
Spitzenlastversorgung 107
spontane Ionisation 56 f.
Spuren eines α-Strahlers 79
Stabglimmlampe 8
Stabmagnet 35 f.
Stadtgas 107
Stahlerzeugung 65
Ständer 46
Stärke des Magnetfeldes 37
Stator 46 f.
Stäube 101
Staudamm 103
Stausee 104
Steckdosen 31
Steinfraß 100
Steinkohle 97 f., 107
Steinkohleeinheit 97
Sterilisation 94
Stern der „zweiten Generation" 112
Stickoxid 101 f.
STOKES, GEORGE GABRIEL 72
Stoßionisation 59 f., 62, 64
Strahlenbelastung 91
Strahleneinwirkung von außen 91
Strahleneinwirkung von innen 91
Strahlenexposition 92
Strahlenexposition der Bevölkerung 91
Strahlenquelle 91
Strahlenschäden 91
Strahlenschäden an einer Hand 92
Strahlenschutz 92
Strahlenschutzanzüge 93
Strahlenschutzverordnung 92, 94
Strahlung, kosmische 91
Strahlung, terrestrische 91
Strahlungsleistung 114
STRASSMANN, FRITZ 87, 90
Strom 18, 99
Stromanzeigegeräte 7
Strompreis 17
Stromquelle 6
Stromrechnung 13
Stromstärke 9, 18
Stromzähler 14
STURGEON, WILLIAM 38
Südpol 36
Supernova 112
Supernovaexplosion 112
Supraleitung 123
Symbol des chemischen Elements 75
Szintillation 78
Szintillationsmessgerät 79
Szintingramm der Schilddrüse eines Menschen 86

t-I-Diagramm 44
Tauchsieder 9
technische Stromrichtung 34, 35
technische Wechselspannung 46
technische Wechselstromgeneratoren 46
technischer Transformator 50
technischer Wechselstrom 46
technischer Widerstand 26
Teersand 97
Teilspannung 27
terrestrische Strahlung 94
therapeutische Zwecke 93 f.
thermische Ionisation 58
thermische Nutzung 115
Thermosgefäß 9
THOMSON, JOSEPH-JOHN 73, 77
Thorium 83
Transformator 48, 54
Transformator, idealer 50
Transformator, streufeldfreier 50
Transformator, verlustfreier 50
Transformatorgesetze 48
Treibhauseffekt 103
Tritium 89
Tschernobyl, Kernreaktorunfall 102, 110
Turbine 106

U-I-Diagramm 18 f.
Überdüngung 102
Überlandleitungen 52
Übersetzungsverhältnis des Transformators 49

Übertragung elektrischer Energie 54
Übertragung elektrischer Energie auf große Entfernungen 52
ultraviolette Strahlung 61
ultraviolettes Licht 58
Ultraviolettstrahlung 56, 61
Umspannstation 54
Umspannwerk 54
Umweltbelastung 100
Umweltbelastungen bei der Energieumwandlung 100
unbelasteter Transformator 48, 54
unerwünschte Energiearten 14
unselbständige Gasentladung 57 f.
unverzweigter Stromkreis 27
Uran 83, 100
Uran, Vorrat 97
Uran-Radium-Zerfallsreihe 86
Urknall 112
Ursprungsgerade 18, 23
UV-Lampe 61
UV-Strahler 13
UV-Strahlung 57
UVW-Regel der linken Hand 34, 70
UVW-Regel der rechten Hand 35, 45

Verbrennen fossiler Stoffe 106
Verbrennungsprodukte 100
Verdampfer 121
Verflüssiger 121
Verkehr 99 f.
Verlustenergie 13
verlustfreier Transformator 54
Verschmelzung 111
verzweigter Stromkreis 29
Verzweigungsdosen 31
Vielfachmessinstrumente 20
Volt 6
VOLTA, ALESSANDRO GUISEPPE 21
Vulkanausbruch 101

Waldsterben 100 ff.
Wärme 13, 16, 120
Wärmeabgabebilanz eines Einfamilienhauses 121
Wärmebelastung 103
Wärmekraftwerk 106, 108
Wärmepumpe 122
Wärmepumpe, Funktionsprinzip 122
Warnsymbol für radioaktive Strahlung 92
Wasser 100, 108
Wasser, schweres 88
Wasserdampf 103
Wasserkraftwerk 104
Wasserkraftwerk, Wirkungsgrad 105
Wasserstoff 118
Wasserstoff, schwerer 89
Wasserstoff, überschwerer 89
Wasservorrat 97
Wattsekunde 12
Wechselspannung 44, 45, 47, 54
Wechselstrom 44
Wechselstromgenerator 44
WEIZSÄCKER, CARL FRIEDRICH VON 88
Weltenergievorräte an fossiler Brennenergie 97
Werkstoffprüfung 94
Wetterverhältnisse 113
Widerstandsformel 24
Widerstandsmessung 18
WILSON, CHARLES THOMSON REES 84
Wilson-Nebelkammer 84
Wind 100
Windenergie 103
Winderosion 102
Windkonverter 98
Windungszahl der Induktionsspule 36 f.
Wirkungsgrad 13, 16, 96
Wirkungsgrad der Umwandlung 106

Xenonhochdrucklampe 65

zeitlicher Verlauf des radioaktiven Zerfalls 85
Zerfall von Atomkernen 82
Zerfallsprodukte bei der natürlichen Radioaktivität 86
Zerfallsreihe 86
Zerfallsreihe des Urans 85
Zinksulfid 78
Zinksulfidschicht 61
Zündspannung 42, 60 ff.
Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Arbeitszeit t 9
Zusammenhang zwischen der elektrischen Arbeit W_{el} und der Stromstärke I 10
Zweielektrodenröhre 66

3270